

Automatização de Bancas Didáticas de Óleo-Hidráulica

Pedro Ricardo Carvalho Dias Carneiro

Dissertação do MIEM

Orientador: Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Ramo de Automação

Julho de 2013

*"Our greatest weakness lies in giving up.
The most certain way to succeed is always to try just one more time."*

Thomas Edison (1847 – 1931)

Resumo

As bancas didáticas são uma ferramenta de ensino essencial, assumindo-se como o primeiro contacto dos estudantes com componentes e instrumentos utilizados nos sistemas que usam como meio de transmissão de energia a óleo-hidráulica. São, pois, um meio indispensável para aquisição de sensibilidade prática e espírito crítico na análise e construção deste tipo de sistemas.

A presente dissertação pretende ser um contributo tangível para o ensino prático laboratorial da óleo-hidráulica consistindo no desenvolvimento de um conjunto organizado de exercícios didáticos automatizados para demonstrar aos estudantes várias características e comportamentos destes sistemas.

Como base para desenvolvimento dos exercícios automatizados, foram utilizadas as bancas didáticas de óleo-hidráulica, presentes no laboratório de Óleo-Hidráulica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, equipadas com um autómato programável, interface homem-máquina, elementos de atuação e comando. Estas bancas possuem ainda uma elevada flexibilidade, uma vez que, permitem a montagem de um elevado número de circuitos hidráulicos distintos.

Foram, portanto, implementados diversos exercícios didáticos automatizados envolvendo hidráulica convencional e/ou proporcional, medições, monitorizações e sequências de movimentos pré-programadas programadas que se entendem servir de exemplo inicial para a construção futura de um conjunto mais alargado de meios para apoio ao ensino experimental nesta área do conhecimento.

Concluída a implementação dos exercícios, foram conduzidos testes para comprovar o seu correto funcionamento, onde se evidenciou possuírem uma grande utilidade para a compreensão de sistemas óleo-hidráulicos, seus comportamentos e fenómenos associados.

Didactic Oil-hydraulic Bench Automation

Abstract

Didactic benches are an essential educational tool, enabling students a first hands-on contact with components and instruments used in systems that using oil-hydraulic energy as a transmission media. They are, thus, an indispensable means for the acquisition of practical sensibility and critical spirit on the analysis and construction of hydraulic systems.

This study aims at being a tangible contribution for the experimental teaching of oil-hydraulics, consisting of the development of an organized set of automatic exercises to demonstrate various characteristics and behaviours of these systems.

As a basis for the development of automated exercises, a set of didactic oil-hydraulic benches were used, from the oil-hydraulic lab of the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Oporto. These benches are equipped with a PLC, human-machine interface and various hydraulic actuators and valves. Also, they are very flexible as they allow the assembly of a vast array of hydraulic powerpacks.

Therefore, several automatic exercises were implemented involving conventional and/or proportional hydraulic, measurement transducers, monitoring and motion sequences pre-programming, as a set of initial examples for a future more comprehensional set of exercises for teaching aid.

After the implementation of these exercises, tests were conducted to verify the correct operation and it was shown that they are important and easy way for the understanding of oil-hydraulic systems behaviour and phenomena.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas, incansável mestre na partilha de conhecimentos e no inculcar de responsabilidade. Também pela sua exigência e incentivo demonstrados durante a realização desta dissertação.

Ao Sr. Joaquim Silva, técnico de laboratório, por toda a sua disponibilidade, pela partilha de conhecimentos, pelo companheirismo e pelas sugestões dadas ao longo da dissertação.

Aos colegas e amigos estudantes de Dissertação presentes no laboratório de Óleo-Hidráulica, Ana Ribeiro, Rafael Correia, Jorge Sousa e Sérgio Cunha; pela ajuda e disponibilidade, pela crítica e pelas sugestões dadas ao longo da dissertação.

A todos os restantes colegas e amigos do ramo de automação pelo apoio e disponibilidade.

Aos meus pais, Maria Emília Carneiro e Fernando Carneiro, por todo o apoio anímico e financeiro que permitiram a minha formação superior.

Ao meu irmão, Hélder Carneiro, pelo companheirismo e apoio nos momentos mais nebulosos. Foi sem dúvida um grande braço de apoio.

A todos os meus amigos e amigas que não foram mencionados, grandes apoios nesta caminhada e que representam muito para mim.

A todos, os meus mais sinceros agradecimentos ...

Índice de Conteúdos

| | |
|--|-----------|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Descrição das Bancas Didáticas de Óleo-hidráulica | 1 |
| 1.2. Objetivos da Dissertação | 3 |
| 1.3. Organização da Dissertação..... | 3 |
| 2. Caracterização dos Equipamentos..... | 5 |
| 2.1. Armário de Comando..... | 5 |
| 2.1.1. Autómato Programável..... | 7 |
| 2.1.2. Interface Homem-Máquina | 8 |
| 2.2. Consola Hidráulica | 9 |
| 2.2.1. Circuito Hidráulico da Consola..... | 9 |
| 2.2.2. Componentes da Consola | 10 |
| 2.3. Central Hidráulica | 11 |
| 2.4. Instrumentação..... | 12 |
| 2.4.1. Transdutor Analógico de Proximidade | 12 |
| 2.4.2. Transdutor de Pressão | 14 |
| 2.4.3. Detetor de Proximidade..... | 15 |
| 2.4.4. Detetores de Fim de Curso | 15 |
| 2.4.5. Taquímetro DC..... | 16 |
| 2.4.6. Pressostatos | 17 |
| 2.5. Válvulas de Comando..... | 18 |
| 2.5.1. Válvulas Hidráulicas Convencionais | 18 |
| 2.5.2. Válvulas Hidráulicas Proporcionais | 19 |
| 3. Interface Homem-Máquina: Estrutura de Programação e Comando Manual | 21 |
| 3.1. Programação da Interface Gráfica | 21 |
| 3.1.1. Configuração Tipo das Janelas | 21 |
| 3.2. Estrutura de Programação | 23 |
| 3.3. Comando Manual..... | 25 |
| 4. Exercícios Didáticos de Hidráulica Convencional | 29 |
| 4.1. Grupo de Exercícios A – Cilindro de Duplo Efeito..... | 30 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.1.1. | Análise Prévia do Circuito Hidráulico | 32 |
| 4.1.2. | Exercício A.1 | 34 |
| 4.1.3. | Exercício A.2 | 38 |
| 4.1.4. | Exercício A.3 | 44 |
| 4.1.5. | Exercício A.4 | 48 |
| 4.1.6. | Apreciação Geral dos Resultados | 51 |
| 4.2. | Grupo de Exercícios B – Motor Bidirecional..... | 52 |
| 4.2.1. | Análise Prévia do Circuito Hidráulico | 53 |
| 4.2.2. | Exercício B.1..... | 54 |
| 4.2.3. | Exercício B.2..... | 57 |
| 4.2.4. | Exercício B.3..... | 60 |
| 4.2.1. | Apreciação Geral dos Resultados | 62 |
| 4.3. | Grupo de Exercícios C – Dinâmica de Válvulas Direcionais..... | 63 |
| 4.3.1. | Exercício C.1..... | 64 |
| 4.3.2. | Exercício C.2..... | 67 |
| 4.3.3. | Exercício C.3..... | 70 |
| 4.3.4. | Apreciação Geral dos Exercícios..... | 73 |
| 5. | Exercícios Didáticos de Hidráulica Proporcional..... | 75 |
| 5.1. | Controlos Desenvolvidos | 76 |
| 5.1.1. | Controlo de Pressão | 76 |
| 5.1.2. | Controlo de Velocidade de Rotação de Motor Hidráulico | 77 |
| 5.1.3. | Controlo de Posição do Motor Hidráulico..... | 78 |
| 5.2. | Grupo de Exercícios D – Módulo de Compressibilidade e Fugas por Válvula | 80 |
| 5.2.1. | Exercício D.1 | 82 |
| 5.2.2. | Exercício D.2 | 86 |
| 5.2.3. | Apreciação Geral dos Exercícios..... | 89 |
| 5.3. | Grupo de Exercícios E – Motor Bidirecional..... | 90 |
| 5.3.1. | Exercício E.1..... | 91 |
| 5.3.2. | Exercício E.2..... | 93 |
| 5.3.3. | Apreciação Geral dos Exercícios..... | 100 |
| 6. | Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros | 101 |
| 6.1. | Conclusões..... | 101 |
| 6.2. | Sugestões para Trabalhos Futuros | 103 |
| 7. | Referências e Bibliografia..... | 105 |

| | |
|---|------------|
| ANEXO A – Janelas da Interface Homem-Máquina | 107 |
| ANEXO B – Alertas e Avisos..... | 125 |
| ANEXO C – <i>GRAFCET</i>'s Funcionais | 129 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1: Banca didática de óleo-hidráulica | 2 |
| Figura 2.1: Armário de comando | 6 |
| Figura 2.2: Parte traseira do armário de comando | 6 |
| Figura 2.3: Autômato programável 1 | 7 |
| Figura 2.4: Autômato programável 2 | 8 |
| Figura 2.5: Interface Homem-Máquina | 8 |
| Figura 2.6: Circuito hidráulico da consola | 9 |
| Figura 2.7: Cilindros hidráulicos | 10 |
| Figura 2.8: Motor hidráulico bidirecional..... | 10 |
| Figura 2.9: Manómetros de <i>Bourdon</i> | 11 |
| Figura 2.10: Central hidráulica | 11 |
| Figura 2.11: Circuito da central hidráulica | 11 |
| Figura 2.12: Armário elétrico da central hidráulica..... | 12 |
| Figura 2.13: Transdutor analógico de proximidade <i>Telemecanique</i> XS4-P30AB120 | 12 |
| Figura 2.14: Curva de saída do transdutor de proximidade analógico | 13 |
| Figura 2.15: Característica experimental do transdutor de proximidade | 13 |
| Figura 2.16: Característica experimental do transdutor de proximidade | 14 |
| Figura 2.17: Transdutor de pressão <i>STW</i> A08 | 14 |
| Figura 2.18: Característica experimental do transdutor de pressão | 14 |
| Figura 2.19: Detetor de proximidade da série SIEN da <i>FESTO</i> | 15 |
| Figura 2.20: Detetor de fim de curso D-Z73 da <i>SMC</i> | 15 |
| Figura 2.21: Taquímetro DC..... | 16 |
| Figura 2.22: Filtro Passa Baixo | 16 |
| Figura 2.23: Característica experimental do taquímetro DC | 16 |
| Figura 2.24: Pressostato <i>Norgren Herion</i> | 17 |
| Figura 2.25: Esquema elétrico do amplificador eletrónico | 19 |
| Figura 3.1: Estrutura “tipo” das janelas..... | 22 |
| Figura 3.2: Janela Inicial..... | 23 |
| Figura 3.3: Menu inicial dos Exercícios Didáticos de Hidráulica Convencional..... | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.4: Menu inicial dos Exercícios Didáticos de Hidráulica Proporcional | 24 |
| Figura 3.5: Estrutura de programação da interface..... | 24 |
| Figura 3.6: Comando Manual – Painel inicial..... | 25 |
| Figura 3.7: Comando Manual – Janela "Central" | 25 |
| Figura 3.8: Comando Manual – Janela "Saídas Digitais"..... | 26 |
| Figura 3.9: Comando Manual – Janela "Saídas Analógicas" | 26 |
| Figura 3.10: Comando Manual – Janela "Entradas Digitais"..... | 27 |
| Figura 3.11: Comando Manual – Janela "Entradas Analógicas" | 27 |
| Figura 3.12: Comando Manual – Janela "Ajuda" | 27 |
| Figura 4.1: Grupo de Exercícios A – Circuito hidráulico | 30 |
| Figura 4.2: Grupo de Exercícios A - Movimento de Avanço | 32 |
| Figura 4.3: Grupo de Exercícios A - Movimento de Recuo | 33 |
| Figura 4.4: Exercício A.1 – Erros de posicionamento dos detores de fim de curso..... | 37 |
| Figura 4.5: Exercício A.2 - Diagrama temporal do movimento de avanço | 38 |
| Figura 4.6: Exercício A.2 - Diagrama temporal do movimento de avanço | 38 |
| Figura 4.7: Exercício A.3 - Diagrama temporal | 44 |
| Figura 4.8: Exercício A.4 – Diagrama temporal..... | 48 |
| Figura 4.9: Grupo de Exercícios B – Circuito hidráulico | 52 |
| Figura 4.10: Grupo de Exercícios C – Circuito hidráulico genérico | 63 |
| Figura 4.11: Exercício C.1 - Circuito hidráulico | 64 |
| Figura 4.12: Exercício C.1 - Diagrama temporal..... | 64 |
| Figura 4.13: Exercício C.2 - Circuito hidráulico | 67 |
| Figura 4.14: Exercício C.2 - Diagrama temporal..... | 67 |
| Figura 4.15: Exercício C.2 - Gaveta da Válvula Direcional 4/2 | 69 |
| Figura 4.16: Exercício C.3 - Circuito Hidráulico | 70 |
| Figura 4.17: Exercício C.3 - Diagrama Temporal | 70 |
| Figura 5.1: Diagrama de blocos do controlo de pressão | 76 |
| Figura 5.2: Inversa da curva característica experimental da válvula limitadora de pressão proporcional..... | 77 |
| Figura 5.3: Diagrama de blocos do controlo de velocidade de rotação do motor..... | 77 |
| Figura 5.4: Inversa da curva característica experimental da válvula reguladora de caudal proporcional..... | 78 |
| Figura 5.5: Controlo de posição do motor | 78 |
| Figura 5.6: Grupo de Exercícios D - Circuito Hidráulico | 80 |
| Figura 5.7: Compressão do volume de óleo presente na câmara secundária..... | 82 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.8: Resultados do exercício D.1..... | 84 |
| Figura 5.9: Representação de válvula direcional de gaveta de translação | 86 |
| Figura 5.10: Resultados do exercício D.2..... | 88 |
| Figura 5.11: Exercício D.2 - Fugas pela válvula | 88 |
| Figura 5.12: Grupo de Exercícios E - Circuito hidráulico | 90 |
| Figura 5.13: Exercício E.2 - Perfil de Velocidades..... | 93 |
| Figura 5.14: Resultados do exercício E.2 (Movimento rápido) | 97 |
| Figura 5.15: Resultados do exercício E.2 (Movimento médio) | 98 |
| Figura 5.16: Resultados do exercício E.2 (Movimento lento) | 98 |
| Figura 5.17: Resultados do exercício E.2 (Movimento muito lento)..... | 99 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1: Resultados Exercício A.1 (Estrangulamento “Nulo”)..... | 36 |
| Tabela 4.2: Resultados Exercício A.1 (Estrangulamento “Médio”) | 36 |
| Tabela 4.3: Resultados Exercício A.1 (Estrangulamento “Grande”)..... | 37 |
| Tabela 4.4: Resultados Exercício A.2 (Estrangulamento “Nulo”)..... | 41 |
| Tabela 4.5: Resultados Exercício A.2 (Estrangulamento “Médio”) | 42 |
| Tabela 4.6: Resultados Exercício A.2 (Estrangulamento “Grande”)..... | 42 |
| Tabela 4.7: Resultados Exercício A.3 (Estrangulamento “Nulo”)..... | 46 |
| Tabela 4.8: Resultados Exercício A.3 (Estrangulamento “Médio”) | 46 |
| Tabela 4.9: Resultados Exercício A.3 (Estrangulamento “Grande”)..... | 47 |
| Tabela 4.10: Resultados Exercício A.4 (Estrangulamento “Grande”)..... | 50 |
| Tabela 4.11: Resultados Exercício A.4 (Estrangulamento “Muito Grande”)..... | 50 |
| Tabela 4.12: Resultados do exercício C.1 | 66 |
| Tabela 4.13: Resultados do exercício C.2 | 69 |
| Tabela 4.14: Resultados do exercício C.3 | 72 |
| Tabela 5.1: Exercício E.2 - Tempos | 97 |

1. Introdução

As bancas didáticas de óleo-hidráulica presentes no laboratório de Óleo-Hidráulica do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto possuem diversas potencialidades que as tornam capazes de realizar, de forma automática, exercícios didáticos para a análise de características funcionais de componentes e de circuitos óleo-hidráulicos típicos.

Estes exercícios são, pois, uma ferramenta importante para a aprendizagem de sistemas que usam como meio de transmissão de energia a óleo-hidráulica, na medida em que são perspectivados para demonstrar aos estudantes variadas características e comportamentos deste tipo de sistemas.

Em muitas circunstâncias é adequado serem realizados exercícios experimentais sob o comando direto, manual, do utilizador. Em outras circunstâncias são inegáveis as vantagens que se podem atribuir a exercícios que podem ser realizados de um modo automático, para benefício do rigor, da qualidade dos procedimentos adotados e da segurança exigida.

Assim sendo, é nesta perspectiva que surge o tema da presente dissertação: “Automatização de Bancas Didáticas de Óleo-hidráulica”. Insere-se na unidade curricular de Dissertação do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, opção Automação, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, realizado sob a orientação do Professor Francisco Jorge Teixeira de Freitas e decorrido no 2º semestre do ano letivo 2012/2013.

No presente capítulo, é feita uma descrição das bancas didáticas de óleo-hidráulica utilizadas bem como a exposição dos objetivos que este trabalho se propõe alcançar.

1.1. Descrição das Bancas Didáticas de Óleo-hidráulica

As bancas didáticas permitem a montagem de circuitos hidráulicos elementares e, portanto, pouco complexos, mas com grande potencialidade para a análise e extração de características importantes para o conhecimento de sistemas óleo-hidráulicos típicos. Possuem um autómato programável, como elemento central de comando, que permite a realização de exercícios de forma automática ou com o mínimo necessário de intervenção humana. Por outro lado, a central hidráulica associada é destacável o que

permite que cada banca possa ser combinada com uma central hidráulica potencialmente diferente (débitos de caudal eventualmente diferentes).

Relativamente à sua construção hidráulica, as válvulas são montadas sobre placas base e possui ligações rápidas por mangueiras flexíveis a atuadores.

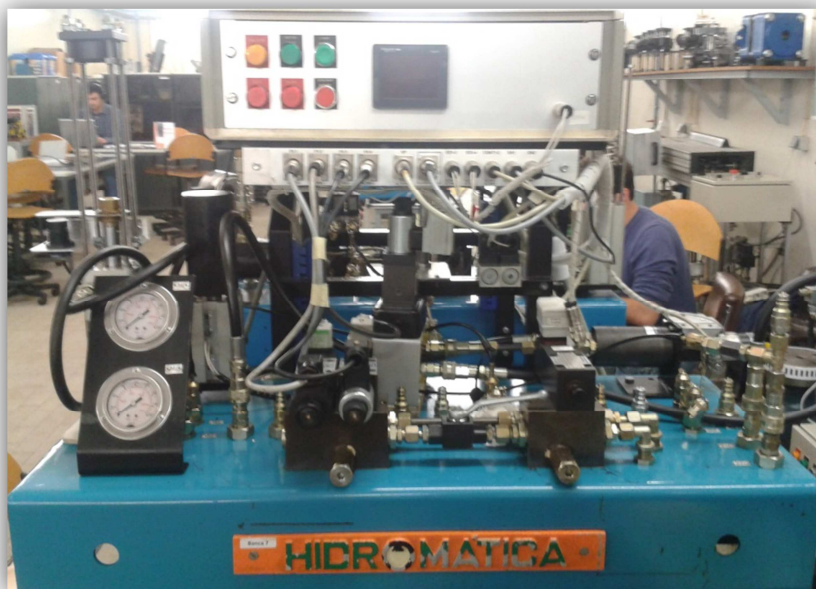


Figura 1.1: Banca didática de óleo-hidráulica

De um modo geral, todas as bancas didáticas de óleo-hidráulica são equipadas com:

- 2 atuadores hidráulicos lineares de duplo efeito assimétrico de cursos diferentes (50 [mm] e 100 [mm]);
- 1 motor hidráulico bidirecional;
- válvulas direcionais de 2 e 3 posições, válvulas limitadoras de pressão, válvulas estranguladoras de caudal e válvulas de retenção simples e pilotadas.

Já no que respeita ao comando, estão equipadas com um autómato programável *TWIDO* da *Schneider Electric* com:

- 24 entradas e 16 saídas digitais;
- 8 entradas e 2 saídas analógicas.

Por fim, as bancas encontram-se equipadas com uma consola de interface Homem-Máquina com um ecrã tátil de 3,5" policromático, também, da marca *Schneider Electric*.

1.2. Objetivos da Dissertação

A dissertação pretende ser um contributo tangível para o ensino prático laboratorial da óleo-hidráulica consistindo no desenvolvimento de um conjunto organizado de exercícios didáticos automatizados para ajuda ao aluno, como ferramenta de ensino numa perspetiva de progressividade de exigência e compreensão dos fenómenos associados.

Estes exercícios serão concebidos para as bancas didáticas de óleo-hidráulica existentes no Laboratório de Óleo-hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Para este objetivo de conceber, desenvolver e colocar em funcionamento, com suporte documental, um conjunto de exercícios didáticos, podem ser identificados como tarefas suplementares a atingir as seguintes:

- Criação de um ambiente de interface entre o utilizador e a banca, “interface Homem-Máquina”, apelativa, autoexplicativa e indutora da geração de conhecimento, mas de simples utilização;
- Criação de capacidade de “Comando Manual” que permita a um utilizador mais conhecedor poder prescindir do apoio automático e manter as características de “comando manual” que é sempre interessante para esta classe de utilização.

1.3. Organização da Dissertação

No capítulo 2 é feita uma análise detalhada da banca sobre a qual incide a dissertação, sendo descritos e caracterizados os diferentes componentes incluídos nesta. É também feita uma descrição da consola hidráulica, armário de comando e central hidráulica.

No capítulo 3 é feita uma descrição da estrutura de programação da interface homem-máquina bem como dos diferentes elementos de atuação que a constituem. É aqui também feita a descrição do módulo de “Comando Manual” desenvolvido que permite a atuação manual das diversas saídas do autómato bem como a observação do estado de cada uma das suas entradas.

No capítulo 4 são apresentados os exercícios de hidráulica convencional que foram desenvolvidos. Aqui é feita uma descrição de cada exercício, bem como a sua implementação na interface. Também são apresentados e analisados os resultados obtidos em cada um deles.

No capítulo 5 são apresentados os exercícios de hidráulica proporcional que foram desenvolvidos. Tal como no capítulo anterior, é feita uma descrição de cada

exercício e sua implementação na interface. Também são apresentados e analisados os resultados obtidos em cada um deles.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões mais relevantes que resultam do trabalho realizado, sendo no final, sugeridas propostas para enriquecer o trabalho realizado até à data e atualizar as bancas didáticas.

Por fim, são incluídos alguns anexos, onde são apresentadas as janelas construídas ao longo do trabalho que não constam no presente documento, bem como, os *Grafcet's* de suporte aos exercícios.

2. Caraterização dos Equipamentos

Neste capítulo é feita uma análise detalhada das bancas didáticas de óleo-hidráulica e feita a caraterização dos equipamentos que se encontram nestas.

Sendo assim, as partes aqui abordadas são organizadas da seguinte forma:

- **Armário de comando:** descrição dos componentes presentes no armário de comando;
- **Consola hidráulica:** apresentação do suporte infraestrutural para a construção de circuitos hidráulicos na banca e descrição dos componentes disponíveis para utilização;
- **Central hidráulica:** apresentação das caraterísticas nominais das centrais hidráulicas;
- **Instrumentação:** apresentação dos diversos órgãos de deteção e de medição eletrónicos disponíveis;
- **Válvulas de comando:** apresentação das diversas válvulas utilizadas e dispositivos de eletrónica de comando.

2.1. Armário de Comando

As bancas didáticas de óleo-hidráulica estão equipadas com um armário de comando. É neste armário que se encontra instalado o autómato programável, a interface homem-máquina, o painel de conexões elétricas bem como monitorizações com sinalizadores da central hidráulica (motor ligado, disjuntor, óleo, filtro) e botões de comando da central (ligar motor, desligar motor).

O painel de conexões elétricas permite a ligação de equipamentos ao armário de comando. Este é constituído pelas seguintes fichas:

- **4 Fichas XLR de painel fêmea (3 pinos)** – utilizadas para comando dos solenóides das válvulas direcionais;
- **2 Fichas XLR de painel fêmea (5 pinos)** – preparadas para comandar válvulas proporcionais através de um amplificador eletrónico;
- **5 Fichas XLR de painel fêmea (7 pinos)** – permitem a ligação dos detetores de proximidade e pressostatos (até um máximo de 6) e a ligação de transdutores (até um máximo de 4).



Legenda:

- Monitorizações da Central Hidráulica / ----- Comando da Central Hidráulica
- Interface Homem-Máquina
- Saídas Digitais / ----- Saídas Analógicas
- Entradas Digitais / ----- Entradas Analógicas

Figura 2.1: Armário de comando

Por fim, falta referir que na parte traseira do armário de comando existem duas fichas de interface:

- **Ficha de interface de potência de 10 pinos macho:** utilizada para ligar a central hidráulica ao armário, permitindo a alimentação elétrica deste, bem como realizar o comando da central;
- **Ficha de interface de comando de 24 pinos fêmea:** ficha de interface entre o armário de comando e um eventual equipamento externo a ser controlado.



Figura 2.2: Parte traseira do armário de comando

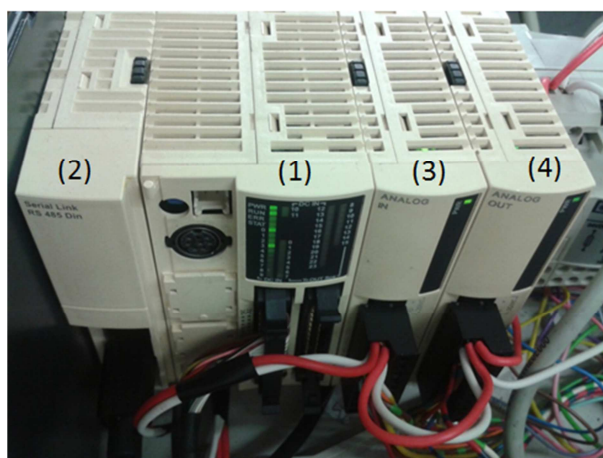
2.1.1. Autômato Programável

Os autômatos programáveis presentes nas bancas didáticas são mini-autômatos do modelo *Twido* da *Schneider Electric*.

Estes autômatos são modulares, isto é, são constituídos por um conjunto de módulos que permitem configurar de um modo flexível o número de entradas e saídas analógicas e digitais do autômato, por inclusão, ou não de módulos adicionais ao módulo base.

Nestas bancas os autômatos têm duas configurações diferentes, isto é, foram usados dois autômatos com módulos diferentes. Um dos autômatos é constituído pelos seguintes módulos:

- **Base Modular TWDLMDA40DTK:** possui 24 entradas digitais isoladas (onde duas têm frequências de leitura de 5 kHz) e 16 saídas digitais por transístor;
- **Módulo de Entradas Analógicas TWDAMI8HT:** possui 8 entradas analógicas com uma gama de leitura de 0 a 10 V e uma resolução de 10 bit;
- **Módulo de Saídas Analógicas TWDAV02HT:** possui 2 saídas analógicas bipolares (-10 V a 10 V) e uma resolução de 11 bit mais 1 bit de sinal;
- **Módulo Série TWDNOZ485D:** permite a ligação de comunicação série RS 485.

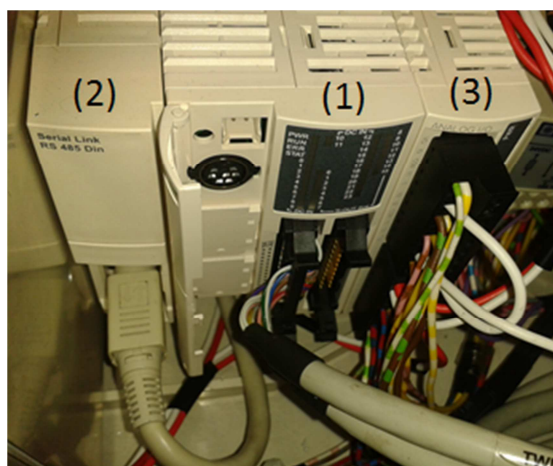


Legenda:

- 1 – Base Modular;
- 2 – Módulo Comunicação Série;
- 3 – Módulo de Entradas Analógicas
- 4 – Módulo de Saídas Analógicas

Figura 2.3: Autômato programável 1

O outro autômato utilizado possui a mesma base modular e o mesmo módulo de comunicação série. No entanto, possui o módulo de entradas/saídas analógicas TM2AMM6HT, que possui 4 entradas analógicas (gama de leitura 0 – 10 V) e 2 saídas analógicas monopolares (0-10 V) e uma resolução de 12 bit.



Legenda:

- 1 – Base Modular;
- 2 – Módulo Comunicação Série;
- 3 – Módulo de Entradas/Saídas Analógicas.

Figura 2.4: Autômato programável 2

2.1.2. Interface Homem-Máquina

Instalada em cada banca, encontra-se uma interface homem-máquina *Magelis STU 655* da *Schneider Electric*.



Figura 2.5: Interface Homem-Máquina

Esta interface gráfica possui um ecrã policromático TFT LCD, com superfície tátil resistiva, com uma resolução de imagem de 320 x 240 pixels (QVGA) e possui uma área resolução tátil de 50 x 50 pontos.

Este equipamento possui duas portas de comunicação *USB*, uma porta de comunicação *COM1* e uma porta de comunicação *Ethernet*, que possibilitam a comunicação com outros dispositivos informáticos. As portas *USB* são utilizadas para a comunicação da interface homem-máquina com um computador ou a ligação de dispositivos de armazenamento externo de dados. Por outro lado, a porta *Ethernet* permite a ligação da HMI a uma rede local ou pública, possibilitando assim que esta comunique com outros dispositivos ligados na mesma rede. A porta *COM1* (que utiliza

um conector *RJ45* de 8 pinos) permite a ligação da interface ao módulo de comunicação série do autómato, utilizando um protocolo *Modbus* [1].

2.2. Consola Hidráulica

A consola hidráulica é a infraestrutura mecânica de suporte a todos os componentes hidráulicos que, em cada momento se pretendam incorporar numa montagem para realizar um exercício. É, de seguida, feita uma descrição desta consola e dos componentes disponíveis para serem utilizados em cada uma delas.

2.2.1. Circuito Hidráulico da Consola

As consolas hidráulicas possuem blocos, com furação compatível com a montagem em placa base normalizada e com válvula de segurança, que permitem a montagem de diversos tipos de válvulas, até um máximo de três válvulas.

Ainda possuem tomadas rápidas para ligação por mangueiras flexíveis aos atuadores bem como tomadas para leituras de pressão e uma válvula de isolamento entre o primeiro e o segundo bloco.

Na figura abaixo apresentada, encontra-se o circuito hidráulico da consola hidráulica.

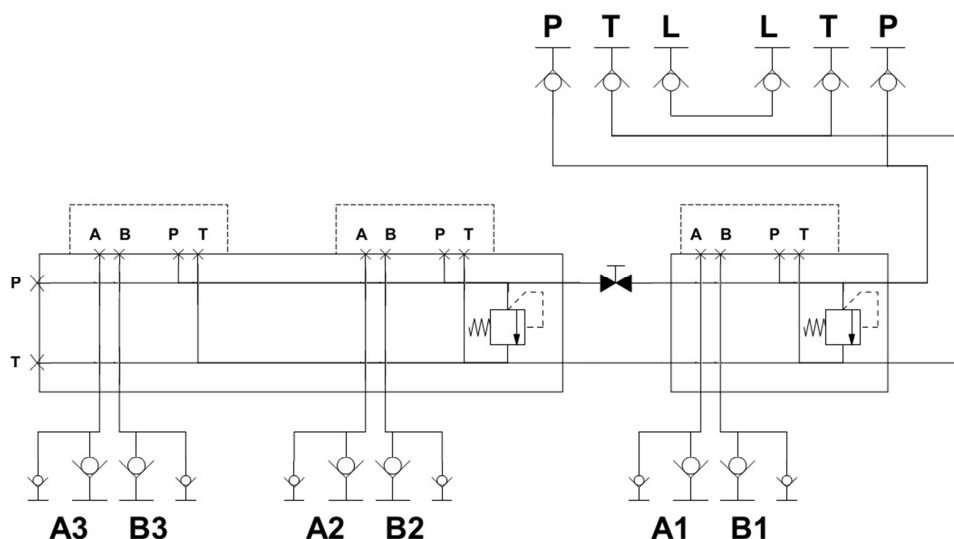


Figura 2.6: Circuito hidráulico da consola

2.2.2. Componentes da Consola

As bancas didáticas encontram-se equipadas com dois cilindros hidráulicos, um motor bidirecional e manómetros de *Bourdon*.

Os dois cilindros presentes nas bancas são de êmbolo magnético e diferem apenas no curso, mantendo-se iguais os diâmetros do êmbolo e da haste, sendo estes de 40 mm e de 24 mm, respetivamente. Quanto aos cursos, um dos cilindros possui 50 mm e o outro 100 mm [2].



Figura 2.7: Cilindros hidráulicos

O motor hidráulico bidirecional (Trocoidal tipo Gerotor) possui uma cilindrada de 20 cc/rot [3]. Acoplado ao veio do motor encontra-se uma roda dentada e um disco graduado. Com a roda dentada e recorrendo a um detetor indutivo é possível determinar a velocidade de rotação e o ângulo descrito em cada movimento.

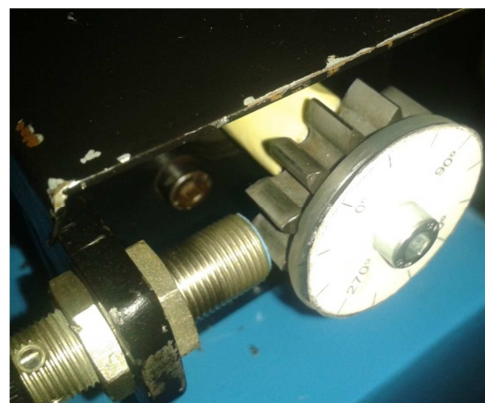


Figura 2.8: Motor hidráulico bidirecional

Por fim, cada uma das bancas encontra-se equipada com dois manómetros de *Bourdon* onde é possível efetuar medições de pressão até 160 bar.



Figura 2.9: Manómetros de *Bourdon*

2.3. Central Hidráulica

A central hidráulica possui um reservatório de óleo com capacidade para 50 litros com indicação e monitorização do nível do óleo, por interruptor elétrico.

Possui também um motor elétrico trifásico da *EFACEC*, de 1,5 kW e uma velocidade de rotação nominal de 1500 rpm, para acionamento de uma bomba de engrenagem exterior com um débito de caudal de 6,5 l/mim e com uma pressão máxima de funcionamento de 60 bar, limitada por uma válvula limitadora de pressão.



Figura 2.10: Central hidráulica

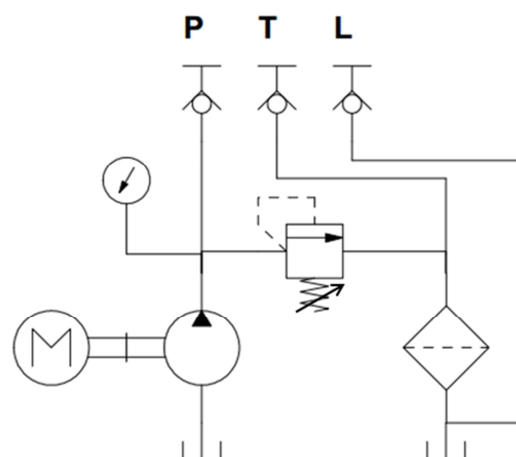


Figura 2.11: Circuito da central hidráulica

Na central hidráulica existe ainda um armário elétrico onde é possível comandar a central hidráulica, selecionar o posto de comando (alternar o comando entre o armário elétrico da central e o armário de comando), verificar os sinalizadores das monitorizações da central (central ligada, nível do óleo, condição do filtro, disparo térmico do disjuntor).

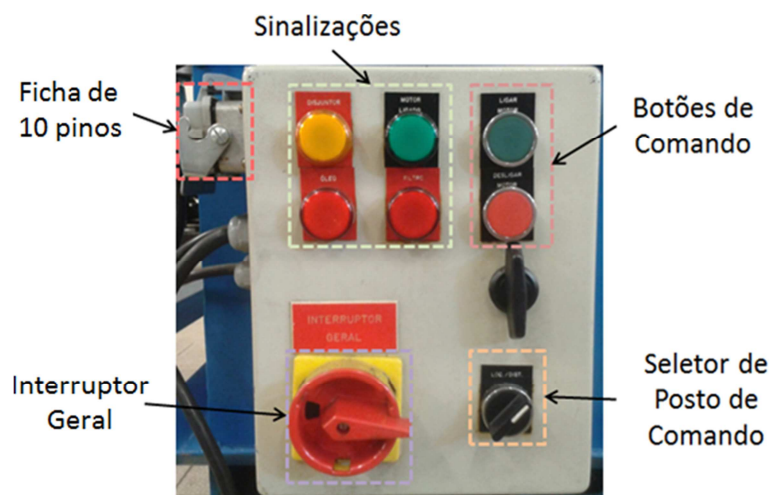


Figura 2.12: Armário elétrico da central hidráulica

Aqui, também existe a ficha de 10 pinos fêmea para ligação da central ao armário de comando. Por fim, existe ainda um interruptor geral que corta a alimentação elétrica da central hidráulica e do armário de comando.

2.4. Instrumentação

2.4.1. Transdutor Analógico de Proximidade

Para a medição de pequenos deslocamentos, é utilizado um transdutor de proximidade do tipo indutivo *XS4-P30AB120*, da *Telemecanique*, que possui saída analógica em corrente (4 a 20 [mA]) [4].



Figura 2.13: Transdutor analógico de proximidade *Telemecanique XS4-P30AB120*

Para efetuar leituras de deslocamento com este transdutor é necessário que a superfície móvel seja eletricamente condutora e a distância entre esta e o transdutor esteja compreendida entre 1,5 [mm] e 15 [mm]. Isto porque, fora desta gama de deslocamentos, o transdutor apresenta uma saturação, como se pode verificar na figura abaixo apresentada, retirada da folha de catálogo fornecida pelo fabricante. Verifica-se, no entanto, que a gama compreendida entre 5 e 10 [mm] é particularmente linear.

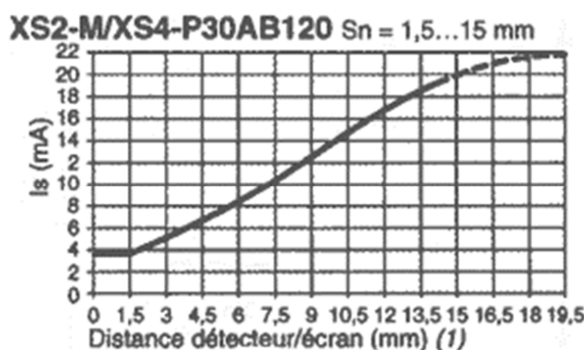


Figura 2.14: Curva de saída do transdutor de proximidade analógico

Uma vez que através do autómato não se pretender valores de corrente por motivos de universalidade, foi colocada uma resistência de 470 [Ω] na ficha de ligação do transdutor, para que o sinal de saída deste fosse convertido em tensão.

Abaixo, encontra-se a curva característica do transdutor analógico de proximidade após a colocação da resistência.

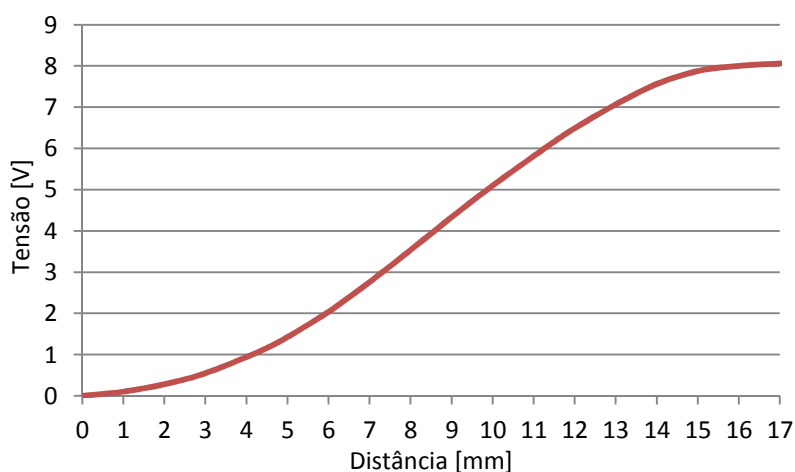


Figura 2.15: Característica experimental do transdutor de proximidade

Como se pode observar, o transdutor analógico de proximidade apresenta uma característica linear entre 4,5 [mm] e 13,5 [mm], o que se encontra de acordo com o esperado, atendendo à característica fornecida pelo fabricante.

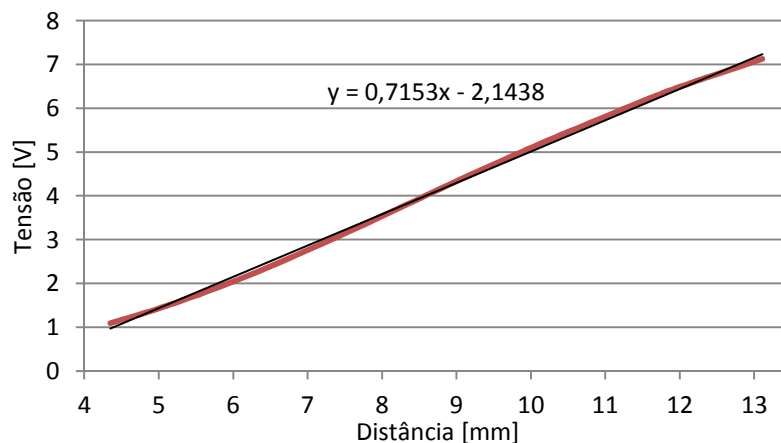


Figura 2.16: Caraterística experimental do transdutor de proximidade

2.4.2. Transdutor de Pressão

Para medição de pressão, foi utilizado um transdutor de pressão A08 da STW. Este transdutor tem uma gama de medição de 0 a 250 [bar] e um sinal de saída analógico em tensão compreendido entre 0 e 10 [V]. Além desta caraterística, este transdutor apresenta uma linearidade de 0,2% e uma histerese e repetibilidade de 0,1% [5].



Figura 2.17: Transdutor de pressão STW A08

Na figura abaixo, encontra-se a curva caraterística do transdutor de pressão obtida experimentalmente, para a gama em utilização nesta aplicação.

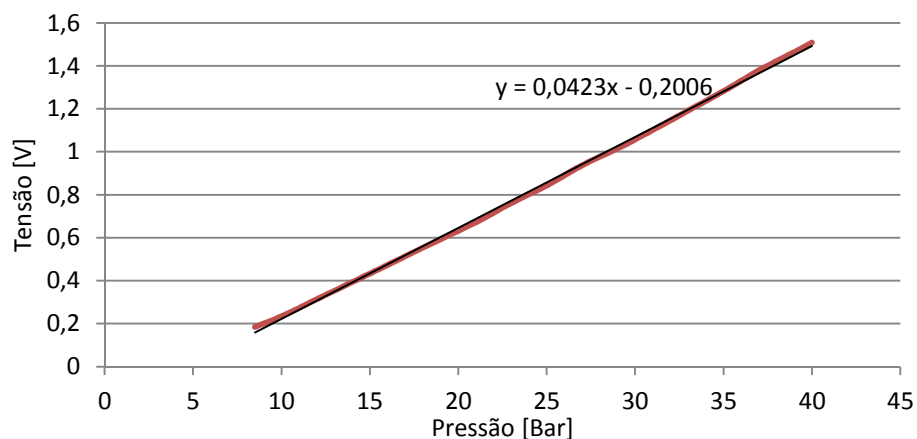


Figura 2.18: Caraterística experimental do transdutor de pressão

Como se pode observar, para uma gama de pressão de 8 a 40 bar, a curva característica deste transdutor de pressão é linear, apresentado um ganho de 0,0423 [V/bar].

Este transdutor, tendo uma gama de medição de 250 [bar], não se encontra perfeitamente ajustado à gama de pressões característica da banca, que não excede os 60 [bar].

2.4.3. Detetor de Proximidade

Para detetar os dentes da roda dentada acoplada ao veio do motor e, assim, para determinar a velocidade de rotação e deslocamento angular, foi utilizado o detetor de proximidade indutivo SIEH-M12B-PS-S-L da *FESTO* [6].



Figura 2.19: Detetor de proximidade da série SIEN da *FESTO*

Este transdutor tem uma frequência máxima de comutação de 3000 [Hz], não deve ser colocado a mais de 4 [mm] do objeto a detetar e possui uma histerese máxima de 0,36 [mm].

2.4.4. Detetores de Fim de Curso

Como já foi referido, para detetar a posição do êmbolo do cilindro, foram usados os detetores magnéticos de fim de curso D-Z73 da marca *SMC*.



Figura 2.20: Detetor de fim de curso D-Z73 da *SMC*

Este detetor de fim de curso possui um curso de atuação de cerca de 12,5 mm e ainda um *led* que se acende quando este se encontra atuado [7].

2.4.5. Taquímetro DC

Para medição da velocidade angular (ou de rotação), foi construído um taquímetro DC de íman permanente que gera uma tensão de saída proporcional à velocidade de rotação do motor hidráulico ao qual está acoplado.



Figura 2.21: Taquímetro DC

Assim sendo, o taquímetro DC foi construído tendo por base num motor elétrico DC de íman permanente. Uma vez que o sinal proveniente do taquímetro inclui ruído, foi implementado um filtro passa baixo com uma frequência de corte de 3 Hz, eliminando assim totalmente o ruído elétrico.

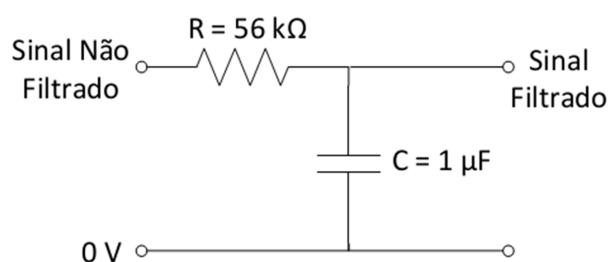


Figura 2.22: Filtro Passa Baixo

Após a implementação do filtro, procedeu-se à extração da característica do taquímetro, abaixo apresentada.

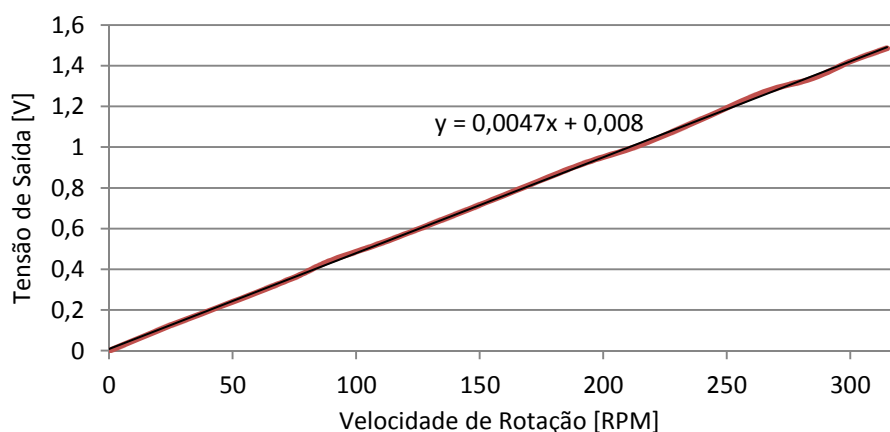


Figura 2.23: Característica experimental do taquímetro DC

2.4.6. Pressostatos

As bancas encontram-se ainda equipadas com dois pressostatos da marca *Norgren Herion* (ref.: 0882100). Possuem uma gama de ajuste de pressão de 5 a 70 [bar], uma histerese compreendida entre 10,5 a 15 [bar] e consegue suportar até 100 comutações por minuto [8].



Figura 2.24: Pressostato Norgren Herion

2.5. Válvulas de Comando

Como foi referido anteriormente, as consolas hidráulicas possuem blocos, com furação compatível com a montagem em placa base normalizada e com válvula de segurança, que permitem a montagem de diversos tipos de válvulas, até um máximo de três válvulas.

Assim sendo, são agora apresentados os diversos tipos de válvulas hidráulicas convencionais e proporcionais utilizadas na presente dissertação.

2.5.1. Válvulas Hidráulicas Convencionais

As válvulas hidráulicas convencionais disponíveis, são [9] [10] [11]:

- **Válvula Direcional 4/3 Vickers DG4V 3S 6C MU H5 60:** válvula de centro “Y” A-B-T e centragem por molas, indicada para caudais até 40 [l/min] e pressões até 350 [bar];
- **Válvula Direcional 4/2 Vickers DG4V 3 2N MU H7 60:** válvula biestável, indicada para caudais até 20 [l/min] e pressões até 350 [bar];
- **Válvula Direcional 4/2 Vickers DG4V 3 2A MU H7 60:** válvula monoestável, indicada para caudais até 20 [l/min] e pressões até 350 [bar];
- **Válvula Direcional 4/3 Duplomatic MD1D-S4/50:** válvula de centro “aberto” P-T e saídas “fechadas” A e B, com centragem por molas, indicada para caudais até 75 [l/min] e pressões até 350 [bar].
- **Válvula Fluxométrica TOGNELLA FT257/5-14:** válvula estranguladora unidirecional de montagem em linha, indicada para caudais até 20 [l/min] e pressões máxima de 400 [bar].

2.5.2. Válvulas Hidráulicas Proporcionais

A utilização de válvulas proporcionais oferece uma grande flexibilidade de comando, que se pode traduzir numa simplificação do circuito hidráulico, construindo-se um circuito, potencialmente, com menos componentes hidráulicos e dispondo de uma maior controlabilidade.

Aas válvulas hidráulicas proporcionais disponíveis são [12] [13] [14]:

- **Válvula Limitadora Proporcional de Assento Axial WANDFLUH-HIDRAULIK AEPSVdN6:** válvula indicada para o comando de pressão até 200 [bar] e caudais até 8 [l/min];
- **Válvula Limitadora Proporcional de Assento Axial Rexroth DBE6-10/315G24NZ4M:** válvula indicada para o comando de pressão até 315 [bar] e caudais até 30 [l/min];
- **Válvula Reguladora de Caudal DUPLOMATIC RPCED1-8/C/51-24:** válvula indicada para o controlo de caudais até 8 [l/min] e uma pressão máxima até 250 [bar].

Para o comando deste tipo de válvulas a partir do autómato foi utilizado o amplificador eletrónico EHH-AMP-702-D-20 da *Vickers*, de montagem em ficha. Este é um amplificador de potência, conversor de um sinal em tensão diferencial [0 a 10 V] numa corrente [0 a 1,6 A] [15].

O esquema elétrico deste amplificador encontra-se abaixo apresentado.

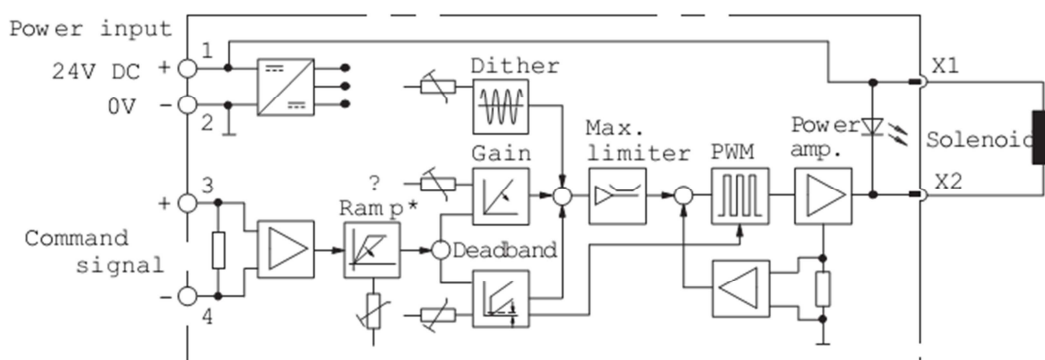


Figura 2.25: Esquema elétrico do amplificador eletrônico

Analisando o esquema apresentado, pode-se concluir que este amplificador possui as seguintes funcionalidades [15] [16]:

- **Ajuste do Ganho:** o ajuste do ganho permite uma combinação mais adequada de válvula e amplificador, de forma a satisfazer as necessidades de qualquer aplicação em particular. O amplificador é um conversor de tensão em corrente, sendo a gama de tensão de entrada de [0 a 10 V] e a gama de corrente de saída de [0 a 1,6 A]. O ganho de conversão do amplificador pode ser ajustado entre 0,02 [A/V] a 0,16 [A/V];
- **Compensação da Zona Morta:** este amplificador pode minimizar ou compensar totalmente a zona morta que possa existir na válvula que comanda. Pode ser ajustado entre 100 e 1000 [mA];
- **“Dither”:** as forças de atrito causam alguma histerese funcional. Para minimizar o efeito dessa histerese, é incluído um sinal de “*dither*” de pequena amplitude e de alta frequência no sinal de comando do eletroímã, colocando assim o componente móvel em vibração. O sinal de “*dither*” proveniente deste amplificador tem uma frequência de 120 [Hz] e a amplitude pode ser ajustada dos 0 aos 500 [mA];
- **Rampa:** permite definir a taxa de variação da saída, com o tempo, de forma a evitar choques hidráulicos. Nesta dissertação, como o amplificador é comandado a partir do autómato por uma saída analógica, a transição “em rampa” é assegurada pelo próprio autómato.

3. Interface Homem-Máquina: Estrutura de Programação e Comando Manual

No presente capítulo, é feita uma descrição das diversas potencialidades da interface Homem-Máquina, e é apresentada a configuração “tipo” das janelas e a estrutura de programação desta.

É, também, descrito o módulo de “Comando Manual” desenvolvido que permite a atuação manual das diferentes saídas do autômato e a observação do estado de cada uma das suas entradas.

3.1. Programação da Interface Gráfica

A interface homem-máquina permite ao utilizador dialogar com a banca didática, isto é, permite que o utilizador dê ordens ao autômato para cumprir diversas tarefas, bem como, mostrar diversas informações (sinais digitais ou analógicos) que chegam ao autômato através da diversa instrumentação da banca. Assim sendo, na interface gráfica o utilizador tem acesso a diversos botões, sinais luminosos, campos numéricos que permitem o diálogo com a banca.

Por outro lado, e para que a interface homem-máquina seja autoexplicativa e de fácil utilização, é possível colocar nesta textos explicativos, diversas imagens, mensagens de alerta e de confirmação, etc. Também é de referir que a interface permite ainda a realização de cálculos o que permite que a informação proveniente da diversa instrumentação analógica chegue devidamente tratada ao utilizador, nomeadamente em unidades convenientes de engenharia.

3.1.1. Configuração Tipo das Janelas

Todas as janelas possuem um botão “Home” que permite retornar ao nível imediatamente acima e um botão “Stop” que ativa a paragem de emergência. Ainda, no lado esquerdo, quando necessário, existe um menu que permite navegar entre as diferentes janelas do nível. Esta tipologia de janela encontra-se apresentada na figura abaixo.

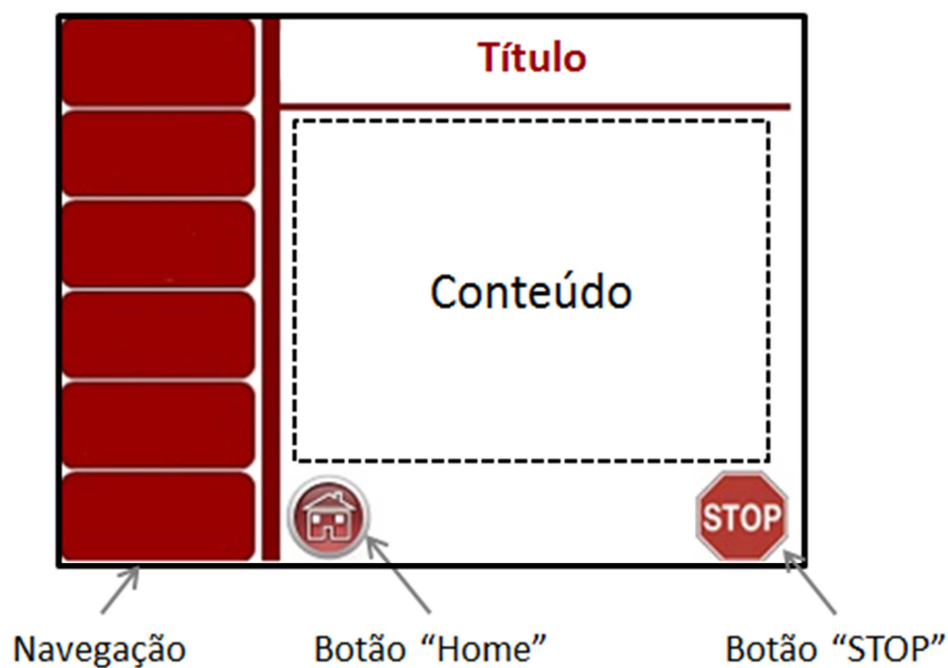





Figura 3.1: Estrutura “tipo” das janelas

3.1.1.1. Botões e Funções

Segue-se agora uma lista de alguns dos botões presentes na interface e sua função:

| Botão | Descrição | Função |
|-------|-------------------------|--|
| | Botão “STOP” | <ul style="list-style-type: none"> • Coloca todas as variáveis no estado “0”; • Caso pressionado durante a execução de um exercício, para-o de imediato; • Desliga a central hidráulica. |
| | Botão “Home” | <ul style="list-style-type: none"> • Retorna à janela do nível imediatamente acima; • Em determinadas situações, desliga a central hidráulica (quando não faz sentido que a central permaneça ligada); |
| | Botão “Seguinte” | <ul style="list-style-type: none"> • Botão de navegação que permite avançar uma janela, dentro do mesmo nível. |
| | Botão “Anterior” | <ul style="list-style-type: none"> • Botão de navegação que permite recuar uma janela, dentro do mesmo nível. |

| | | |
|---|---------------------------|---|
|  | Botão “Incremento” | <ul style="list-style-type: none"> Quando pressionado, incrementa uma variável. |
|  | Botão “Decremento” | <ul style="list-style-type: none"> Quando pressionado, decrementa uma variável. |
|  | Botão “Clear” | <ul style="list-style-type: none"> Quando pressionado, coloca a variável no valor “0”. |

3.2. Estrutura de Programação

Como se poderá ver mais à frente, foram criados dois grandes grupos de exercícios (Exercícios Didáticos de Hidráulica Convencional e Exercícios Didáticos de Hidráulica Proporcional) e, para cada um deles, foi criada uma interface gráfica específica.

Quando a interface é energizada, surge uma janela inicial com informações sobre a presente dissertação.



Figura 3.2: Janela Inicial

Premindo em qualquer local desta janela surge o menu inicial. Aqui é possível seleccionar entre o “Comando Manual” da banca ou “Realizar Exercícios” práticos automatizados. Por outro lado, neste menu é ainda possível consultar a “ajuda”, as

informações “sobre” esta dissertação e ainda consultar informação sobre o estado do “autómato”.



Figura 3.3: Menu inicial dos Exercícios Didáticos de Hidráulica Convencional



Figura 3.4: Menu inicial dos Exercícios Didáticos de Hidráulica Proporcional

Por fim, na figura abaixo apresentada encontra-se a estrutura tipo de cada um dos programas da interface.

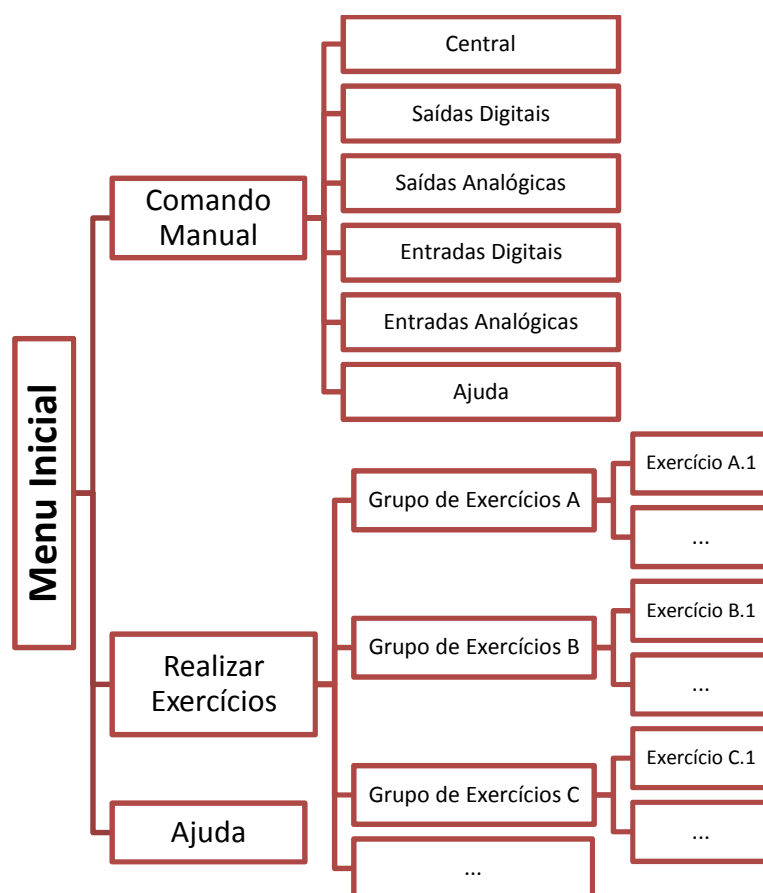


Figura 3.5: Estrutura de programação da interface

3.3. Comando Manual

O módulo “Comando Manual” permite que através de um comando direto manual exercido na consola um utilizador possa ter acesso a toda a capacidade de diálogo com o sistema físico. Tem-se assim acesso a todas as diversas saídas do autómato bem como à observação do estado de cada uma das suas entradas. Sendo assim, este módulo torna todo o sistema de controlo mais flexível, isto é, permite a realização de exercícios e operações sob comando direto manual, para além de todas as ações automatizadas.

Uma vez que este módulo é construído para ser usado por um utilizador dito “comum” e por forma a tornar este módulo com um ambiente “*user-friendly*”, este encontra-se dividido em cinco secções. Na figura abaixo apresentada, encontram-se o painel inicial do módulo de “Comando Manual” da interface homem-máquina (HMI), onde são exibidas as cinco secções funcionais deste módulo.



Figura 3.6: Comando Manual – Painel inicial

Na secção designada “Central” pode-se controlar a central hidráulica e monitorizar algumas sinalizações provenientes desta. Para isso, na janela, encontram-se botões que permitem ligar ou desligar a central hidráulica (botão verde e vermelho, respetivamente), bem com indicadores luminosos caracterizadores do seu estado funcional (nível do óleo baixo e estado da central).



Figura 3.7: Comando Manual – Janela “Central”

Nas secções “Saídas Digitais” e “Saídas Analógicas” podem-se comandar manualmente as diversas saídas do autómato. No caso de se estarem a comandar as saídas digitais, encontram-se disponíveis na interface diversos botões que permitem atuar diretamente as saídas bem como observar o seu estado (se estão atuadas ou não atuadas). Por outro lado, é possível definir uma tensão de saída para cada uma das saídas analógicas, através dos botões de incremento e decremento de valor.

Nas figuras abaixo apresentadas encontram-se, respetivamente, as janelas das secções “Saídas Digitais” e “Saídas Analógicas”.



Figura 3.8: Comando Manual – Janela “Saídas Digitais”



Figura 3.9: Comando Manual – Janela “Saídas Analógicas”

Nas secções “Entradas Digitais” e “Entradas Analógicas” poder-se-ão observar os estados de cada uma delas. No que respeita às entradas digitais, é possível observar o estado de cada um dos sinais através de vários indicadores luminosos. É de salientar que existem duas entradas dedicadas a um contador cuja frequência máxima de aquisição é de 5 kHz.

No caso destas entradas digitais dedicadas poder-se-á optar entre um funcionamento como contador de impulsos ou como frequencímetro. Como já foi referido anteriormente o contador poderá fazer leituras até 5 kHz, isto é, conseguirá ler até 5000 impulsos por segundo e, ainda, há a opção de fazer *Reset* a esta contagem a qualquer momento. Por outro lado, o frequencímetro consegue fazer leituras de frequência entre 1 e 5000 Hz.

No caso das entradas analógicas é possível ver qual a tensão de entrada (de 0 a 10V) em cada uma delas.

Nas figuras abaixo apresentadas encontram-se, respetivamente, as janelas das secções “Entradas Digitais” e “Entradas Analógicas”.



Figura 3.10: Comando Manual – Janela "Entradas Digitais"

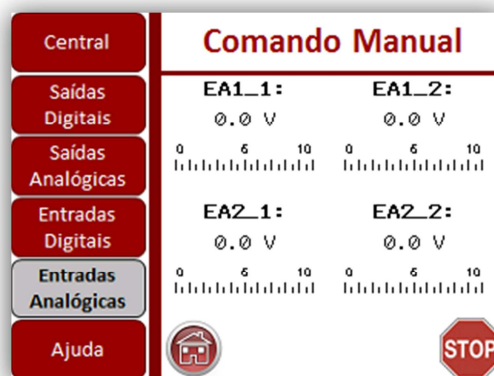


Figura 3.11: Comando Manual – Janela "Entradas Analógicas"

Por fim, na janela ajuda, é possível consultar diversas informações sobre este módulo.

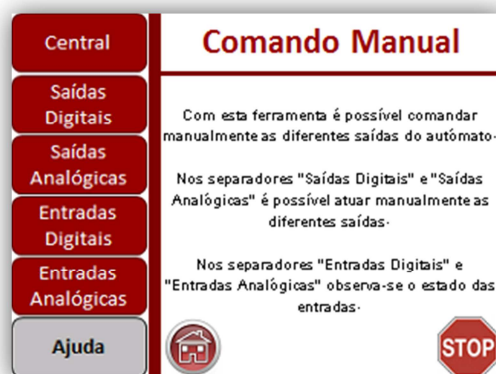


Figura 3.12: Comando Manual – Janela "Ajuda"

4. Exercícios Didáticos de Hidráulica Convencional

No presente capítulo, apresentam-se três grupos de exercícios automatizados que permitem a demonstração e avaliação de várias características e comportamentos de sistemas óleo-hidráulicos que utilizam elementos hidráulicos ditos convencionais:

- **Grupo de Exercícios A:** exercícios para avaliação de características de circuitos hidráulicos compostos por atuador linear e válvula direcional 4/3;
- **Grupo de Exercícios B:** exercícios para avaliação de características de circuitos hidráulicos compostos por motor bidirecional e válvula direcional 4/3;
- **Grupo de Exercícios C:** exercícios para avaliação da dinâmica de válvulas direcionais 4/3 e 4/2.

Nos exercícios que constam neste capítulo, foi utilizada a válvula limitadora de pressão proporcional da *WANDFLUH-HYDRAULIK* apenas com o intuito de limitar a carga de um circuito hidráulico, não se pretendendo fazer qualquer controlo de pressão.

Os exercícios foram programados no autómato tendo por base os *Grafcet's* funcionais disponíveis no anexo C e usando as 'Instruções de *Grafcet*', que é um método disponibilizado pelo *TwidoSuite* para implementação destes.

Ao longo deste capítulo, é feita uma descrição dos exercícios e são apresentados e analisados os resultados de cada um deles. Também é feita uma breve descrição da integração destes exercícios na interface homem-máquina.

4.1. Grupo de Exercícios A – Cilindro de Duplo Efeito

Neste grupo, existe um conjunto de 4 exercícios automatizados que permitem identificar um número significativo de especificidades e propriedades de circuitos hidráulicos constituídos por um atuador linear assimétrico de duplo efeito e uma válvula direcional 4/3. Por forma a obter um controlo do caudal e, assim, um controlo de velocidade do movimento do cilindro, é colocada uma válvula estranguladora em “meter-in” (comando primário). O circuito hidráulico em análise encontra-se apresentado na figura abaixo.

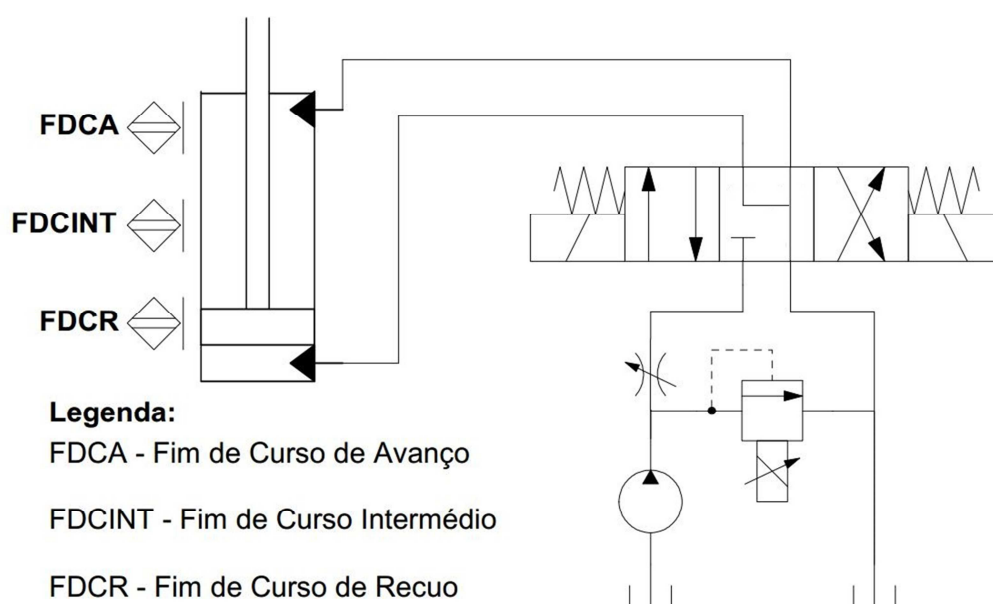


Figura 4.1: Grupo de Exercícios A – Circuito hidráulico

Estão acoplados ao cilindro três detetores de fim de curso, sendo dois colocados nas posições extremas do curso do cilindro (fim de curso de avanço e fim de curso de recuo) e o último colocado próximo do meio do curso do cilindro (fim de curso intermédio).

Então, por forma a determinar de forma faseada propriedades deste tipo de circuitos, este grupo de exercícios encontra-se dividido da seguinte forma:

- **Exercício A.1** – Neste exercício são medidas as velocidades de deslocamento do cilindro (avanço e recuo) para vários níveis de estrangulamento de caudal. Estas medidas são realizadas de uma maneira simples pelo tempo decorrido entre detetores de fim de curso, pelo que se identificam erros associados à localização e ao curso de deteção dos detetores de fim de curso.
- **Exercício A.2** – Tal como no anterior, neste exercício são medidas as velocidades de deslocamento do cilindro (avanço e recuo) para vários níveis de estrangulamento do caudal. No entanto, ao contrário do exercício A.1, neste são utilizadas as potencialidades do autómato para identificar e compensar os erros

de reconhecimento do curso a partir dos detetores de fim de curso de avanço e de recuo;

- **Exercício A.3** – Neste exercício, o cilindro movimenta-se em torno do comprimento de deteção do fim de curso intermédio, por forma a medir os tempos de atuação em volta deste detetor, para diferentes velocidades do atuador;
- **Exercício A.4** – Por fim, neste exercício o cilindro movimenta-se em torno somente de uma transição do detetor de fim de curso intermédio, por forma a avaliar o tempo de resposta do circuito, que corresponde essencialmente ao tempo de resposta do autómato e da válvula direcional, para diferentes velocidades do atuador.

Quanto à forma de implementação deste grupo de exercícios na interface Homem-Máquina, são apresentadas inicialmente um conjunto de janelas (ver Anexo A) onde é possível:

- Ter uma breve descrição do grupo de exercícios,
- Selecionar o cilindro hidráulico objeto de estudo,
- Verificar o circuito hidráulico,
- Ligar a central,
- Selecionar o exercício pretendido.

4.1.1. Análise Prévia do Circuito Hidráulico

Segue-se agora uma análise do circuito hidráulico apresentado na Figura 4.1. Como se pode observar no circuito este possui uma válvula estranguladora de caudal em “Meter-In” (comando primário), uma válvula direcional 4/3, e um cilindro hidráulico com um diâmetro de êmbolo de 40 mm e um diâmetro da haste de 22,4 mm. Sendo assim, a razão de áreas do cilindro é:

$$R_A = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{\pi}{4} D^2}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)} = \frac{D^2}{D^2 - d^2} = 1,46 \quad (1)$$

Sabe-se que o caudal que atravessa um estrangulador é função da raiz quadrada da queda de pressão neste, isto é:

$$Q = K \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \text{Onde: } K = C_d \cdot A_{est} \quad (2)$$

Observando a equação acima apresentada, pode-se concluir que quanto menor é a área de passagem de caudal, menor é o valor de K (maior o nível de estrangulamento) e, conseqüentemente, menor é o caudal que atravessa o estrangulador.

Analisar-se-á agora o movimento de avanço do cilindro.

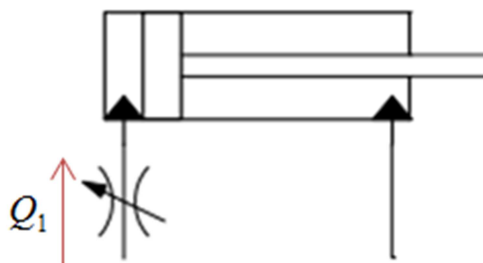


Figura 4.2: Grupo de Exercícios A - Movimento de Avanço

Uma vez que o cilindro se desloca sem qualquer força externa durante o movimento de avanço, a pressão na câmara principal do cilindro é teoricamente nula. Pode-se, assim, antecipar que a queda de pressão no estrangulador seja igual à própria pressão da bomba. Caso assim seja, para um determinado nível de estrangulamento, o caudal que atravessa o estrangulador é:

$$Q_1 = K \cdot \sqrt{\frac{2p_{Bomba}}{\rho}} \quad (3)$$

Então, a velocidade de avanço do cilindro é dada por:

$$v_1 = \frac{K}{A_1} \cdot \sqrt{\frac{2p_{Bomba}}{\rho}} \quad (4)$$

No movimento de recuo, tal como no avanço, a carga externa aplicada ao cilindro é nula, e, sendo assim, podemos antecipar que a pressão na câmara secundária do cilindro seja teoricamente nula.

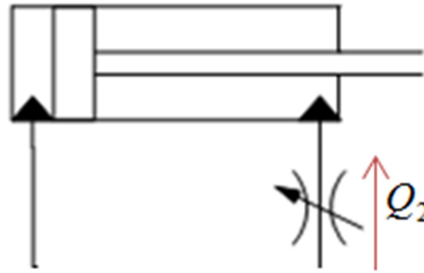


Figura 4.3: Grupo de Exercícios A - Movimento de Recuo

Assim sendo, tal como no avanço, a queda de pressão no estrangulador poderá ser igual à pressão da bomba. Portanto, para um determinado nível de estrangulamento, o caudal que atravessa o estrangulador virá igual ao caudal calculado para o avanço, isto é:

$$Q_2 = K \cdot \sqrt{\frac{2p_{Bomba}}{\rho}} \quad (5)$$

No entanto, a velocidade do cilindro durante o movimento de recuo irá ser maior, sendo dada por:

$$v_2 = \frac{K}{A_2} \cdot \sqrt{\frac{2p_{Bomba}}{\rho}} \quad (6)$$

Relacionando agora a velocidade do movimento de avanço e de recuo:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{K}{K} = \frac{1}{R_A} \Leftrightarrow R_A = \frac{v_2}{v_1} \quad (7)$$

Observando a equação agora apresentada, pode-se concluir que a velocidade de recuo é maior que a velocidade de avanço, sendo a razão de áreas igual à razão entre a velocidade de recuo e a velocidade de avanço.

4.1.2. Exercício A.1

Tal como já foi referido, neste exercício são calculadas as velocidades de avanço e de recuo do cilindro, de forma automática, para vários níveis de estrangulamento. Neste exercício, o cilindro efetua um movimento de avanço e outro de recuo e é medido o tempo que cada um destes movimentos demora a ser executado, para cálculo das velocidades.

Caso este exercício fosse realizado “manualmente”, ter-se-ia de dispor de um cronómetro e o utilizador iria atuar manualmente o comando da válvula direcional, cronometrando o tempo decorrido entre esse comando da válvula e o fim de cada movimento.

Com a realização deste exercício por meios automáticos, e sendo o atuador dotado de detetores de fim de curso, pode-se dizer, de um modo simplista, que o tempo de cada um dos movimentos é o tempo decorrido entre a transição descendente do detetor de fim de curso do início do movimento e a transição ascendente do detetor de fim de curso do fim do movimento.

Uma vez que durante o exercício, o caudal debitado pela bomba e o nível de estrangulamento se mantêm inalterados, os caudais envolvidos em cada um dos movimentos são teoricamente iguais e a razão entre a velocidade de recuo e de avanço do cilindro deve ser igual à razão de áreas do cilindro.

Esta verificação experimental pode, assim, tornar-se como um objetivo essencial deste exercício a ser conduzido automaticamente e com os cálculos, igualmente, automáticos dos resultados.

É de notar que, de forma a garantir que ambos os movimentos se realizam nas mesmas condições, a válvula, no início de cada movimento, deve encontrar-se na sua posição central (não atuada).

4.1.2.1. Interface Homem-Máquina

Antes de ser possível realizar o exercício, são apresentadas janelas onde se encontram explicados, de uma forma simples e sucinta, os objetivos do exercício e onde são apresentados os diagramas temporais que o caracterizam para uma mais fácil compreensão do exercício (Anexo A).

Após as janelas introdutórias, surge a seguinte sequência de janelas:

| | Avango | Recuo |
|----------|--------|-------|
| t [s] | | |
| v [mm/s] | | |
| Q [lpm] | | |

vR/vA: Iniciar

Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.

| | Avango | Recuo |
|----------|-------------|-------------|
| t [s] | Em Execução | Em Execução |
| v [mm/s] | Em Execução | Em Execução |
| Q [lpm] | Em Execução | Em Execução |

vR/vA: Parar

Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.

| | Avango | Recuo |
|----------|--------|-------|
| t [s] | 0.90 | 0.65 |
| v [mm/s] | 111.1 | 153.8 |
| Q [lpm] | 8.3 | 7.9 |

vR/vA: 1.38 Novo

Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados são exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

4.1.2.2. Resultados Obtidos

Foram realizados 3 exercícios A.1, para diferentes estrangulamentos, e obtiveram-se os seguintes resultados:

- **Movimentos para um Estrangulamento “Nulo”**

| Movimento de Avanço | | Movimento de Recuo | |
|---|--------------|--------------------|--------------|
| $t_{\text{Avanço}}$ | 0,99 [s] | t_{Recuo} | 0,69 [s] |
| $V_{\text{Avanço}}$ | 101,0 [mm/s] | V_{Recuo} | 144,9 [mm/s] |
| $Q_{\text{Avanço}}$ | 7,6 [l/min] | Q_{Recuo} | 7,5 [l/min] |
| $V_{\text{Recuo}}/V_{\text{Avanço}} = 1,43$ | | | |

Tabela 4.1: Resultados Exercício A.1 (Estrangulamento “Nulo”)

Sabendo que a razão de áreas do cilindro é de 1,46, e com base nos resultados obtidos, é possível verificar que a razão de áreas obtida difere do valor teórico em 1,5%, o que não é significativo.

Em complemento, observando os caudais envolvidos em cada um dos movimentos é possível observar que estes são quase iguais, como seria de esperar.

No entanto, numa análise mais cuidada é possível verificar que os caudais obtidos são maiores que o caudal efetivamente debitado pela bomba da central ($Q_{\text{teórico}}=6,5$ [l/min]).

Como o caudal é medido (calculado) através do curso nominal do atuador e pelo tempo decorrido entre os dois detetores de fim de curso, ou o valor do curso está errado ou o tempo medido está errado.

Efetivamente pode facilmente concluir-se que esta diferença se deve aos erros de posicionamento dos detetores de fim de curso, que não estão exatamente colocados de modo a identificarem os extremos físicos do curso do cilindro e, portanto, o curso nominal não corresponde ao curso efetivamente percorrido entre detetores de fim de curso.

Assinala-se, no entanto, que os tempos medidos, que são de valor inferior a 1 [s] podem conter algum erro de valor a si associados, do que decorreria um contributo adicional para o erro no resultado obtido.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Médio”**

| Movimento de Avanço | | Movimento de Recuo | |
|---|-------------|--------------------|-------------|
| $t_{\text{Avanço}}$ | 2,20 [s] | t_{Recuo} | 1,68 [s] |
| $V_{\text{Avanço}}$ | 45,4 [mm/s] | V_{Recuo} | 59,5 [mm/s] |
| $Q_{\text{Avanço}}$ | 3,4 [l/min] | Q_{Recuo} | 3,1 [l/min] |
| $V_{\text{Recuo}}/V_{\text{Avanço}} = 1,30$ | | | |

Tabela 4.2: Resultados Exercício A.1 (Estrangulamento “Médio”)

Para este movimento, a razão de áreas obtida ($V_{\text{Recuo}}/V_{\text{Avanço}}$) difere em 10% do valor teórico e os caudais envolvidos em cada um dos movimentos são significativamente diferentes.

É ainda de salientar que, tal como no movimento anterior, os caudais aqui obtidos vêm afetados pelos erros de posicionamento dos detetores de fim de curso, pelo mesmo motivo apontado no movimento anterior.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Grande”**

| Movimento de Avanço | | Movimento de Recuo | |
|---|-------------|--------------------|-------------|
| $t_{\text{Avanço}}$ | 11,59 [s] | t_{Recuo} | 8,05 [s] |
| $V_{\text{Avanço}}$ | 8,6 [mm/s] | V_{Recuo} | 12,4 [mm/s] |
| $Q_{\text{Avanço}}$ | 0,6 [l/min] | Q_{Recuo} | 0,6 [l/min] |
| $V_{\text{Recuo}}/V_{\text{Avanço}} = 1,44$ | | | |

Tabela 4.3: Resultados Exercício A.1 (Estrangulamento “Grande”)

Por fim, para este movimento, a razão de áreas obtidas difere em apenas 1% do valor teórico. Pode-se então afirmar que para caudais pequenos, obtém-se uma melhor aproximação à razão de áreas, uma vez que os erros na leitura dos tempos se tornam menos relevantes.

Com a análise destes resultados, verificou-se que os erros de posicionamento dos detetores de fim de curso provocam imprecisões no cálculo dos caudais envolvidos em cada movimento. Isto deve-se ao facto de, neste exercício, se determinar o tempo entre a transição descendente do detetor de fim de curso de início de movimento e a transição ascendente do detetor de fim de curso de fim de movimento. Como a velocidade é calculada assumindo que curso total do cilindro (l_{efetivo}) é percorrido quando, na realidade, só parte do curso total do cilindro (l_{mov}) o é, o resultado vem afetado. No entanto, como se verifica nos resultados da tabela 4.3 para pequenos caudais os valores de caudal vêm igualmente afetados e, portanto, o resultado da relação de velocidades não evidencia erro.

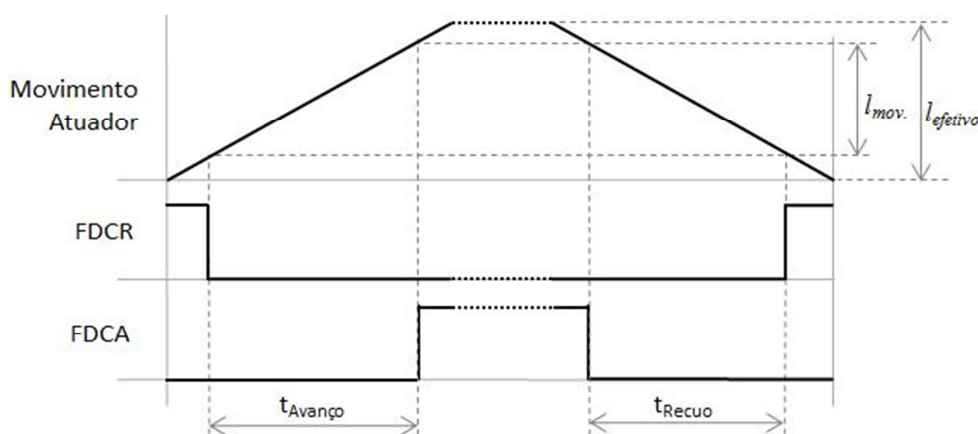


Figura 4.4: Exercício A.1 – Erros de posicionamento dos detores de fim de curso

4.1.3. Exercício A.2

Tal como no exercício A.1, neste exercício são calculadas as velocidades de deslocamento do cilindro tanto no avanço como no recuo. Difere no entanto do anterior, na medida em que é feita uma identificação e compensação automática dos erros inerentes à colocação dos detetores de fim de curso quer de avanço quer de recuo.

Por forma a identificar e compensar os erros inerentes à colocação dos detetores de fim de curso, deve-se começar por assegurar que o cilindro, quer no movimento de recuo, quer no de avanço, parte de uma situação completamente recuado, ou completamente avançado, respetivamente.

São determinados os tempos que medeiam entre a atuação da eletroválvula direcional e a transição descendente do detetor de fim de curso de início de movimento. Para além desta medição, tal como no exercício A.1, é medido o tempo que decorre entre a transição descendente do detetor de fim de curso de início de movimento e a transição ascendente do detetor de fim de curso de fim do movimento. Nas figuras abaixo, apresentam-se os diagramas temporais dos movimentos de avanço e de recuo do cilindro.

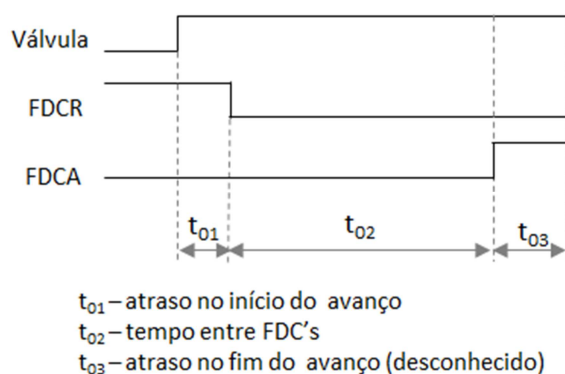


Figura 4.5: Exercício A.2 - Diagrama temporal do movimento de avanço



Figura 4.6: Exercício A.2 - Diagrama temporal do movimento de avanço

Durante o movimento de avanço, partindo o cilindro de uma posição completamente recuado, poderemos medir o tempo decorrido entre a atuação da eletroválvula direcional e a transição descendente do detetor de fim de curso de recuo. Este tempo é aqui designado de “atraso na identificação do início do movimento de avanço”. Também no movimento de recuo, partindo o cilindro da posição completamente avançado, poderemos medir o tempo decorrido entre a atuação da eletroválvula e a transição descende do detetor de fim de curso de avanço. Este tempo será designado de “atraso na identificação do início do movimento de recuo”. Nestes atrasos na identificação do início do movimento, acumulam-se o tempo de atuação da válvula (dinâmica da válvula) e os desvios de posicionamento dos detetores de fim de curso de avanço e de recuo do cilindro.

Por outro lado, os tempos de atraso na identificação do fim do avanço e do fim do recuo são os tempos decorridos entre a transição ascendente do detetor de fim de curso de fim de movimento e a paragem efetiva do cilindro no seu curso máximo. É impossível determinar estes tempos de uma forma experimental, pois o fim de cada movimento não pode ser identificado fisicamente pelos meios disponíveis. No entanto, sabe-se que o atraso na identificação do fim do avanço e o atraso na identificação do início do recuo poderão eventualmente ser suficientemente bem relacionados pela seguinte fórmula:

$$t_{03} = t_{11} \times \frac{t_{02}}{t_{12}} \quad (8)$$

Da mesma forma, a identificação do atraso no fim do recuo e a identificação do atraso no início do avanço poderão ser suficientemente bem relacionados por:

$$t_{13} = t_{01} \times \frac{t_{12}}{t_{02}} \quad (9)$$

Feito isto, é agora possível compensar os desvios identificados e assim determinar, com uma aceitável precisão, o tempo que o cilindro demora a percorrer o seu curso total no movimento de avanço e de recuo:

$$t_{avanço} = t_{01} + t_{02} + t_{03} \quad (10)$$

$$t_{recuo} = t_{11} + t_{12} + t_{13} \quad (11)$$

Determinado o tempo de avanço e de recuo é agora possível calcular os caudais correspondentes a cada um dos movimentos. Ambos os caudais deverão ser iguais, uma vez que o caudal debitado pela bomba e o nível de estrangulamento se mantêm iguais durante o exercício.

Com a realização do exercício A.1 e a identificação dos erros daí decorrentes, a realização deste exercício A.2 fica envolvida na curiosidade de se poder, automaticamente, resolver os problemas incorridos no exercício A.1.

4.1.3.1. Interface Homem-Máquina

Antecedendo a realização do exercício, são exibidas um conjunto de janelas introdutórias onde, de uma forma sucinta, são apresentados os objetivos do exercício, e onde são apresentados os diagramas temporais que caracterizam o exercício (Anexo A).

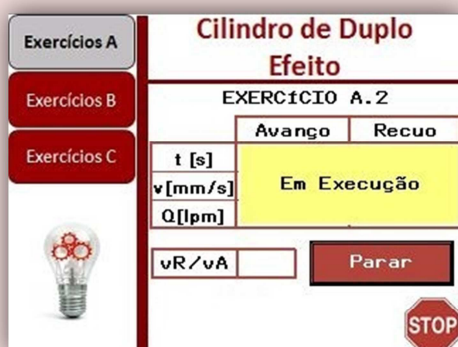
Em seguida às janelas introdutórias, surge a seguinte sequência de janelas:



| | Avango | Recuo |
|----------|--------|-------|
| t [s] | | |
| v [mm/s] | | |
| Q [lpm] | | |
| vR/vA | | |

Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



| | Avango | Recuo |
|----------|-------------|-------------|
| t [s] | Em Execução | Em Execução |
| v [mm/s] | Em Execução | Em Execução |
| Q [lpm] | Em Execução | Em Execução |
| vR/vA | | |

Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



| | Avango | Recuo |
|----------|--------|-------|
| t [s] | 1.36 | 0.92 |
| v [mm/s] | 73.5 | 108.6 |
| Q [lpm] | 5.5 | 5.6 |
| vR/vA | 1.47 | |

Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados serão exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício;
- Premindo na seta “seguinte” é possível consultar os diagramas temporais.



Janela 4 – Diagrama Temporal do Avanço

- É possível ver os vários tempos que caracterizam o movimento de avanço.



Janela 4 – Diagrama Temporal do Recuo

- É possível ver os vários tempos que caracterizam o movimento de recuo.

4.1.3.2. Resultados Obtidos

Para os mesmos níveis de estrangulamento do exercício A.1, foram realizados 3 exercícios. Os resultados obtidos e sua análise apresentam-se abaixo.

- Movimentos para um Estrangulamento “Nulo”**

| Movimento de Avanço | | Movimento de Recuo | |
|---|--------------|--------------------|--------------|
| Atraso no início | 0,18 [s] | Atraso no início | 0,14 [s] |
| Tempo entre FDC's | 1,02 [s] | Tempo entre FDC's | 0,69 [s] |
| Atraso no fim | 0,21 [s] | Atraso no fim | 0,12 [s] |
| $t_{\text{Avanço}}$ | 1,41 [s] | t_{Recuo} | 1,0 [s] |
| $V_{\text{Avanço}}$ | 71,1 [mm/s] | V_{Recuo} | 105,1 [mm/s] |
| $Q_{\text{Avanço}}$ | 5,36 [l/min] | Q_{Recuo} | 5,44 [l/min] |
| $V_{\text{Avanço}}/V_{\text{Recuo}} = 1,48$ | | | |

Tabela 4.4: Resultados Exercício A.2 (Estrangulamento “Nulo”)

Comparado com o exercício A.1, realizado para o mesmo estrangulamento, é possível verificar que o caudal obtido é agora inferior ao caudal nominal debitado pela

bomba. É, então, possível concluir que a compensação dos erros de posicionamento dos detetores de fim de curso foi, pelo menos, bem-sucedida.

Observando a tabela acima apresentada, é possível verificar que os atrasos na identificação do recuo e do avanço representam cerca de 30% do tempo total do movimento. Assim sendo, a compensação traduziu-se numa redução do caudal e da velocidade em relação ao obtido no exercício A.1, em cerca de 30%.

Por outro lado, o erro entre o valor da razão de áreas obtidas e o valor efetivo é de cerca de 1,5 %, o que não é significativo. Este erro deve-se a uma ligeira diferença entre os caudais envolvidos em cada movimento.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Médio”**

| Movimento de Avanço | | Movimento de Recuo | |
|---|-------------|--------------------------|-------------|
| Atraso no início | 0,31 [s] | Atraso no início | 0,19 [s] |
| Tempo entre FDC's | 2,2 [s] | Tempo entre FDC's | 1,69 [s] |
| Atraso no fim | 0,25 [s] | Atraso no fim | 0,23 [s] |
| t_{Avanço} | 2,73 [s] | t_{Recuo} | 2,12 [s] |
| V_{Avanço} | 36,3 [mm/s] | V_{Recuo} | 47,2 [mm/s] |
| Q_{Avanço} | 2,7 [l/min] | Q_{Recuo} | 2,4 [l/min] |
| $V_{Avanço}/V_{Recuo} = 1,30$ | | | |

Tabela 4.5: Resultados Exercício A.2 (Estrangulamento “Médio”)

Observando os resultados obtidos neste movimento, é possível verificar que os atrasos na identificação do início e no fim do movimento representam cerca de 20% do tempo total de cada um dos movimentos, o que se traduz numa redução do caudal e da velocidade em relação aos resultados obtidos no exercício A.1 para o mesmo nível de estrangulamento.

Deste exercício resulta ainda um valor da razão de áreas com um erro 11% em relação ao valor efetivo, consequência de diferenças entre os caudais envolvidos no movimento de avanço e de recuo.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Grande”**

| Movimento de Avanço | | Movimento de Recuo | |
|---|-------------|--------------------------|-------------|
| Atraso no início | 0,84 [s] | Atraso no início | 0,44 [s] |
| Tempo entre FDC's | 11,47 [s] | Tempo entre FDC's | 8 [s] |
| Atraso no fim | 0,63 [s] | Atraso no fim | 0,58 [s] |
| t_{Avanço} | 12,94 [s] | t_{Recuo} | 9,0 [s] |
| V_{Avanço} | 7,7 [mm/s] | V_{Recuo} | 11,1 [mm/s] |
| Q_{Avanço} | 0,6 [l/min] | Q_{Recuo} | 0,6 [l/min] |
| $V_{Avanço}/V_{Recuo} = 1,44$ | | | |

Tabela 4.6: Resultados Exercício A.2 (Estrangulamento “Grande”)

Para caudais de avanço e de recuo muito reduzidos, chega-se a um valor de razão de áreas de 1,44, isto é, um erro de 1% em relação ao seu valor efetivo. Por sua vez, os atrasos na identificação do início e do fim do movimento representam cerca 10% do tempo total de movimento. Pode-se, então afirmar que para caudais baixos, menos relevantes são os atrasos na identificação do início e do fim do movimento.

As diferenças existentes entre os caudais envolvidos no movimento de avanço e de recuo do cilindro, para caudais médios e elevados, poderão dever-se a variações na pressão da central e no orifício T que podem provocar diferentes quedas de pressão no estrangulador no movimento de avanço e de recuo (uma vez que o caudal que atravessa o estrangulador é função da queda de pressão neste).

Assim sendo, para tentar despistar este problema, a válvula estranguladora foi substituída por uma válvula reguladora de caudal, que difere da anterior na medida em que o caudal que a atravessa é pouco influenciado pela queda de pressão nela.

Após esta alteração foi realizado novamente o exercício A.2, donde resultaram valores não muito diferentes dos anteriormente obtidos. Assim, pode-se concluir que os caudais obtidos para cada um dos movimentos não são significativamente afetados por variações na pressão da central e do orifício T.

Excluído este problema, pode-se afirmar que os erros entre os caudais no movimento de recuo e de avanço podem-se dever a imprecisões na aquisição dos tempos dos atrasos na identificação do início do movimento, uma vez que estes valores poderão vir afetados pelo tempo de ciclo do autómato. Assim sendo, para velocidades mais baixas (caudais menores), os erros na aquisição dos tempos atenuam-se, sendo possível determinar com maior rigor a razão de áreas e os caudais envolvidos nos movimentos.

Com este exercício é ainda possível determinar qual o curso de atuação dos detetores de fim de curso de avanço e de recuo. Estes valores serão determinados para o movimento com estrangulamento “grande” pois, como já foi referido, para este os resultados obtidos são menos afetados pelos erros temporais. Assim sendo, e assumindo que o tempo de comutação da válvula é de 60 [ms] (valor de catálogo), pode-se calcular o curso de atuação pela seguinte expressão:

$$l_{atuação} = (t_{x1} - t_{comutação}) \cdot v_{movimento} \quad (12)$$

Então, calcula-se um curso de atuação exposto do detetor de fim de curso de avanço de 6 [mm] e um curso de atuação exposto do detetor de fim de curso de recuo de 4 [mm]. Estes valores representam, respetivamente, 50 % e 32% do valor de catálogo do curso de atuação total dos detetores de fim de curso (12,5 [mm]).

4.1.4. Exercício A.3

Neste exercício, o cilindro movimenta-se em torno do detetor de fim de curso intermédio, por forma a medir os tempos dos movimentos realizados em volta desse detetor, quer no avanço quer no recuo. O diagrama temporal que mostra a evolução do sinal proveniente do detetor de fim de curso intermédio neste exercício é apresentado na figura abaixo.

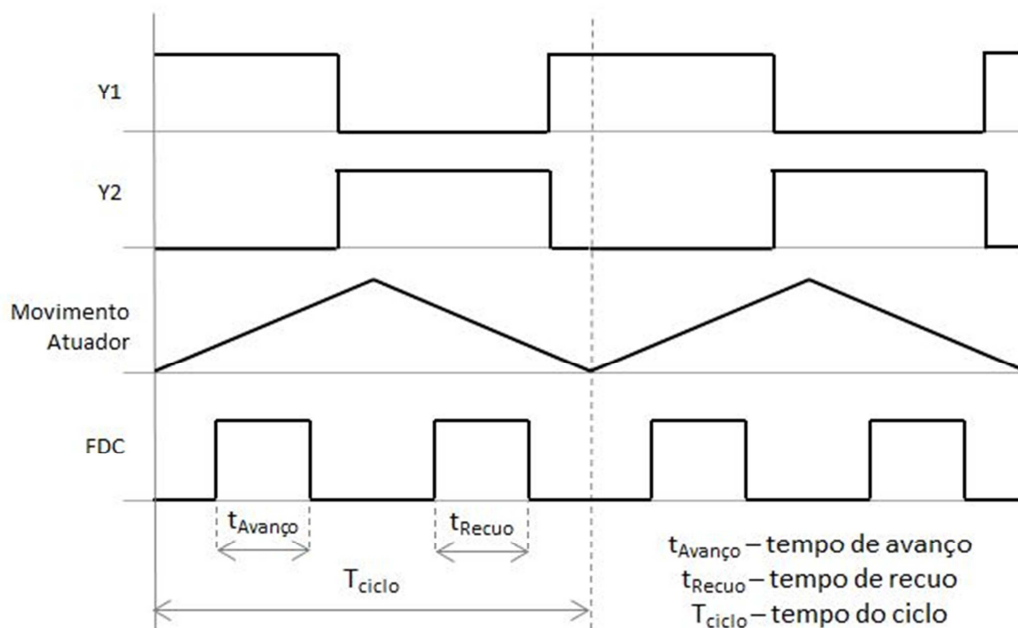


Figura 4.7: Exercício A.3 - Diagrama temporal

Observando o diagrama temporal, conclui-se que cada ciclo é caracterizado por duas transições ascendentes e por duas transições descendentes do detetor de fim de curso intermédio. Ou seja, quando o cilindro efetua o movimento de avanço, é medido o tempo decorrido entre a transição ascendente e descendente do detetor, tempo esse designado de “tempo de avanço”. Mal seja detetada a transição descendente do detetor de fim de curso, é dada a instrução à eletroválvula para inverter o sentido de movimento do cilindro e, assim, inicia-se o movimento de recuo do cilindro. Aqui, também é medido o tempo entre a transição ascendente e descendente do detetor, tempo esse, designado de “tempo de recuo”. Este ciclo repete-se cinco vezes, por forma a obter os melhores valores possíveis.

Quando é dada uma instrução à válvula para inversão do sentido de movimento, o cilindro não inverte de imediato o sentido, ficando durante algum tempo o detetor de fim de curso desatuado. Verifica-se, assim, um sobrecurso realizado pelo atuador. Isto deve-se sobretudo ao tempo de resposta do circuito, que corresponde essencialmente ao tempo de resposta do autómato e da válvula. Este sobrecurso, como é claro, aumenta em função da velocidade do atuador.

Este exercício relaciona-se com o anterior, na medida em que possibilita uma mais fácil compreensão dos atrasos no início e no fim do movimento, que são consequência das características dos fins de curso de avanço e de recuo.

4.1.4.1. Interface Homem-Máquina

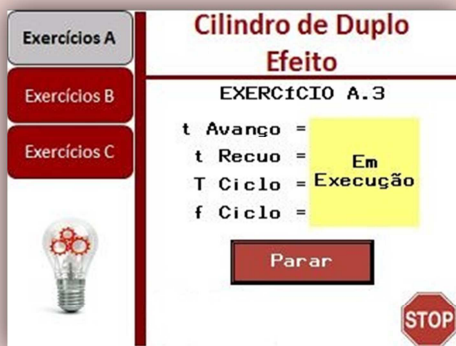
Tal como nos exercícios anteriores, antecedendo a realização do exercício, é exibido na HMI um conjunto de janelas introdutórias com as especificidades do exercício (Anexo A).

De seguida, surge a seguinte sequência de janelas:



Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados são exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

4.1.4.2. Resultados Obtidos

Para os mesmos níveis de estrangulamento dos exercícios analisados anteriormente foram realizados 3 exercícios A.3. Os resultados apresentam-se abaixo.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Nulo”**

| | |
|--------------------------------|-----------|
| $t_{\text{atuação no avanço}}$ | 0,122 [s] |
| $t_{\text{atuação no recuo}}$ | 0,086 [s] |
| T_{ciclo} | 0,528 [s] |
| f_{ciclo} | 1,89 [Hz] |

Tabela 4.7: Resultados Exercício A.3 (Estrangulamento “Nulo”)

Analisando o exercício, e com base nos valores de velocidade obtidos para este estrangulamento no exercício A.2, é possível calcular o valor do curso médio de detecção dos detetores de fim de curso magnéticos através da seguinte expressão:

$$l_{\text{atuação}} = \frac{t_{\text{atuação [Avanço]}} \cdot v_{\text{avanço}} + t_{\text{atuação [Recuo]}} \cdot v_{\text{recuo}}}{2} \quad (13)$$

Através da expressão acima apresentada, chega-se a cursos de atuação do detetor de fim de curso de 8,9 [mm], diferindo do valor de catálogo de 12,5 [mm] em 30%.

Por outro lado, e sabendo que o tempo de ciclo acumula os tempos de atuação e desatuação do detetor durante o movimento do cilindro em torno deste, é possível calcular que o fim de curso permanece desatuado cerca de 320 [ms], ou seja, 60% do tempo de ciclo. Este grande período de desatuação deve-se ao tempo de resposta do circuito aliado às elevadas velocidades dos movimentos ($v_{\text{avanço}}=71,1$ [mm/s] e $v_{\text{recuo}}=105,1$ [mm/s]).

- **Movimentos para um Estrangulamento “Médio”**

| | |
|--------------------------------|-----------|
| $t_{\text{atuação no avanço}}$ | 0,27 [s] |
| $t_{\text{atuação no recuo}}$ | 0,206 [s] |
| T_{ciclo} | 0,784 [s] |
| f_{ciclo} | 1,27 [Hz] |

Tabela 4.8: Resultados Exercício A.3 (Estrangulamento “Médio”)

Com os resultados aqui obtidos, e tendo por base os resultados do exercício A.2 e a expressão anteriormente deduzida, determina-se que o curso de atuação dos

detetores de fim de curso é de cerca de 9,76 [mm], o que difere do valor do catálogo em cerca de 20%, ou seja, para caudais menores obteve-se um curso de atuação mais próximo do valor de catálogo.

Por outro lado, o tempo de desatuação do detetor (igual ao tempo de ciclo menos os tempos de atuação) é de cerca de 308 [ms], representando, agora, apenas 40% do tempo de ciclo. Assim, pode-se verificar que para menores caudais, os efeitos do tempo de resposta do circuito hidráulico tornam-se menos relevantes.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Grande”**

| | |
|--------------------------------|-----------|
| $t_{\text{atuação no avanço}}$ | 1,356 [s] |
| $t_{\text{atuação no recuo}}$ | 0,998 [s] |
| T_{ciclo} | 2,658 [s] |
| f_{ciclo} | 0,38 [Hz] |

Tabela 4.9: Resultados Exercício A.3 (Estrangulamento “Grande”)

Observando os resultados e com base nas velocidades obtidas no exercício A.2, é possível calcular que o curso de atuação é de cerca de 11,8 [mm], diferindo do valor de catálogo em cerca de 14%. Assim sendo, reforça-se a ideia de que, quanto menor forem os caudais envolvidos nos movimentos, com mais precisão é possível calcular os cursos de atuação dos detetores de fim de curso.

Analisando agora o tempo de ciclo é possível afirmar que o detetor, durante o movimento em torno deste, permanece desatuado durante 304 [ms] o que representa apenas 11% do tempo de ciclo. Embora este valor seja muito semelhante ao valor obtido no movimento anterior (308 [ms]), como as velocidades aqui envolvidas são menores, o curso de desatuação será menor.

Então, é possível reforçar a afirmação de que quanto menor forem os caudais envolvidos nos movimentos, menor será a parte do tempo de ciclo em que o detetor permanece desatuado, isto é, menor são os efeitos do tempo de reposta do circuito hidráulico. Também se conclui que para velocidades mais baixas (tempos de atuação mais elevados), os erros associados à aquisição dos tempos tornam-se menos significativos, obtendo-se melhores aproximações do curso de atuação dos detetores de fim de curso ao valor de catálogo.

4.1.5. Exercício A.4

Neste exercício, o cilindro movimenta-se em torno do extremo inferior de deteção do detetor de fim de curso intermédio, isto é, sempre que é detetada uma transição do detetor, o cilindro inverte o seu movimento.

Sendo assim, é possível medir o tempo durante o qual que o detetor está atuado ou desatuado. No tempo de desatuação está refletido o tempo de resposta do circuito que, como já foi referido, corresponde ao tempo de resposta do autómato e da válvula. O diagrama temporal que caracteriza este exercício encontra-se apresentado na figura abaixo.

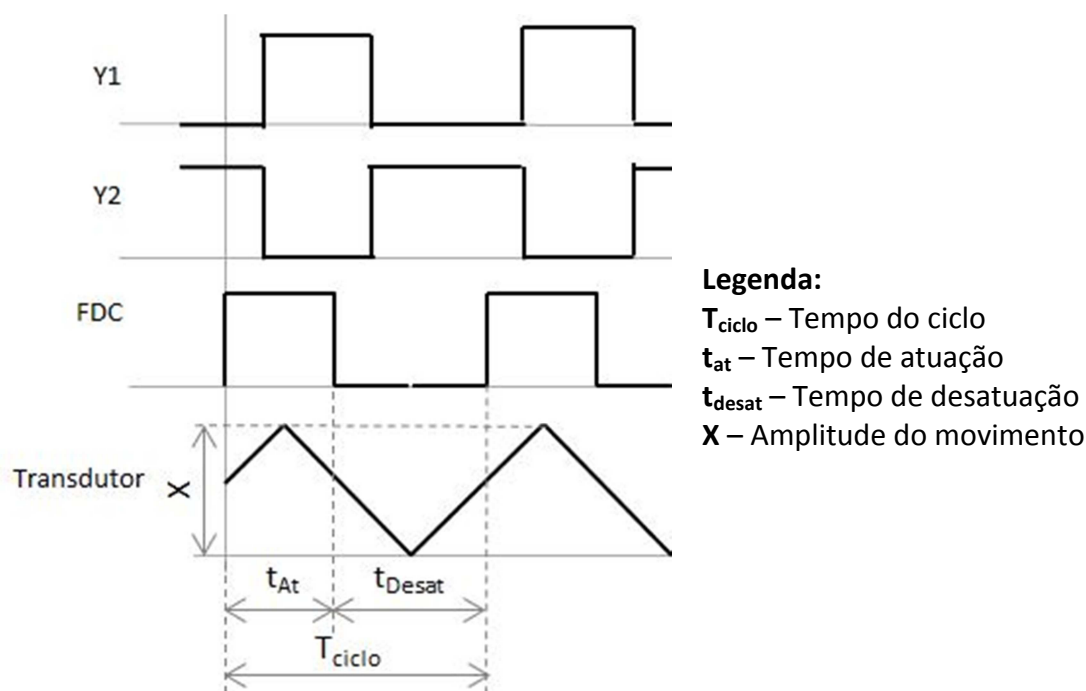


Figura 4.8: Exercício A.4 – Diagrama temporal

Estando o cilindro a efetuar um movimento em torno somente de uma transição do detetor de fim de curso, o movimento resultante é claramente oscilatório. Para a determinação da amplitude de oscilação, recorreu-se a um transdutor analógico de proximidade (ver secção 2.4.1) que produz um sinal em tensão que é função do deslocamento da haste do cilindro.

Por fim, falta ainda referir que o ciclo apresentado repete-se dez vezes para permitir a obtenção de valores mais precisos.

4.1.5.1. Interface Homem-Máquina

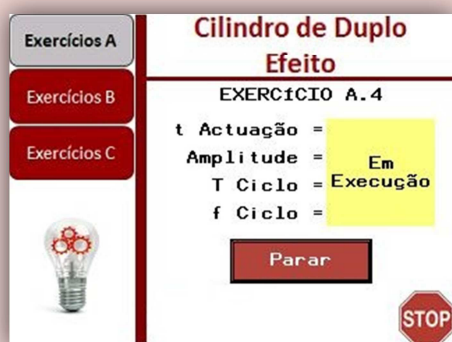
Antes de haver a possibilidade de iniciar o exercício, surge um conjunto de janelas onde é possível ler informações sobre o exercício e posicionar o transdutor analógico de proximidade (Anexo A).

Após estas janelas, surge a seguinte sequência de janelas:



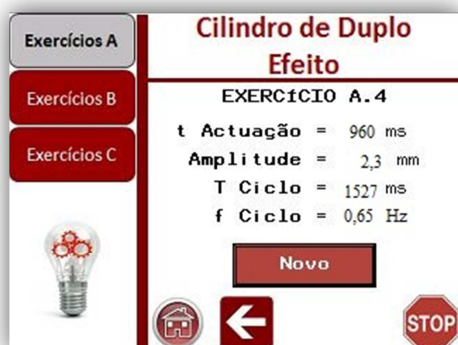
Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados serão exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

4.1.5.2. Resultados Obtidos

Foram realizados dois exercícios A.4, um com um estrangulamento grande ($Q = 0,6$ [l/min]) e outro com um estrangulamento muito grande ($Q = 0,4$ [l/min]). Os resultados obtidos estão abaixo apresentados.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Grande”**

| | |
|----------------------------|-----------|
| t_{atuação} | 0,327 [s] |
| Amplitude | 3,1 [mm] |
| T_{ciclo} | 0,720 [s] |
| f_{ciclo} | 1,39 [Hz] |

Tabela 4.10: Resultados Exercício A.4 (Estrangulamento “Grande”)

Para um caudal de $0,6$ [l/min], isto é uma velocidade de avanço de $7,7$ [mm/s] e de recuo $11,1$ [mm/s], obtém-se uma amplitude de movimento em torno da transição do detetor de fim de curso de $3,1$ [mm].

Por outro lado, obteve-se um tempo de atuação de 327 [ms]. Assim sendo, e com base no tempo do ciclo, é possível determinar que o tempo de desatuação deste é de 393 [ms], ou seja, 54% do tempo de ciclo.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Muito Grande”**

| | |
|----------------------------|-----------|
| t_{atuação} | 0,960 [s] |
| Amplitude | 2,3 [mm] |
| T_{ciclo} | 1,527 [s] |
| f_{ciclo} | 0,65 [Hz] |

Tabela 4.11: Resultados Exercício A.4 (Estrangulamento “Muito Grande”)

Para um caudal de $0,4$ [l/min], isto é, uma velocidade de avanço de $5,3$ [mm/s] e de recuo de $7,7$ [mm/s], obtém-se uma amplitude de movimento em torno da transição do detetor de $2,3$ [mm].

Analisando agora o tempo de ciclo do movimento, pode-se determinar que o fim de curso permaneceu desatuado 567 [ms], isto é, 37% do tempo de ciclo.

Assim sendo, e com base nos valores obtidos no exercício anterior, é possível concluir que quanto de menor velocidade forem os movimentos, menor é a amplitude do movimento e menor é a percentagem do tempo de ciclo em que o detetor permanece desatuado. Ou seja, mais uma vez, é possível concluir que quanto menores os caudais envolvidos nos movimentos, menos se faz sentir o tempo de resposta do circuito.

4.1.6. Apreciação Geral dos Resultados

Agora é feita uma apreciação geral dos resultados dos exercícios que compõem o grupo de exercícios A.

Com a realização do exercício A.1 e A.2 é possível concluir que quanto menores forem os caudais envolvidos em cada um dos movimentos de recuo e avanço, menos se fazem sentir os efeitos do tempo de resposta do circuito que é essencialmente constituído pelo tempo de resposta da válvula e do autómato. Por outro lado, é ainda possível afirmar que se obtém um melhor valor de razão de áreas para estrangulamentos elevados (tempos de movimento mais elevados), dado que os erros de aquisição dos tempos se tornam menos significativos.

Por outro lado, no exercício A.2, nos atrasos na identificação do início e do fim do movimento acumulam-se o tempo de comutação da válvula e o tempo de atuação do detetor de fim de curso.

No exercício A.3, verifica-se que é possível calcular com maior precisão o curso de atuação dos detetores de fim de curso para caudais baixos, uma vez que, para estes caudais, o autómato consegue ler os tempos de atuação com mais rigor. Também é possível verificar que para estes caudais, tomam-se menos relevantes os efeitos do tempo de resposta do circuito hidráulico.

Por fim, no exercício A.4, verifica-se que quanto menor os caudais envolvidos nos movimentos, menor é a amplitude de movimento do cilindro dado que, como já foi referido, tornam-se menos relevantes os efeitos do tempo de resposta do circuito. Por outro lado, para caudais elevados, é impossível medir a amplitude do movimento, dado que esta excede claramente a gama de leitura do transdutor analógico de proximidade (cerca de 9 [mm]).

4.2. Grupo de Exercícios B – Motor Bidirecional

Este grupo é constituído por 3 exercícios automatizados que permitem identificar algumas especificidades e propriedades de sistemas hidráulicos constituídos por um motor bidirecional e uma válvula direcional 4/3. O caudal que chega ao motor pode ser ajustado através da válvula estranguladora colocada em “Meter-In” (comando primário) e assim é possível ter um controlo da velocidade de rotação do motor. O circuito hidráulico em análise encontra-se apresentado na figura abaixo.

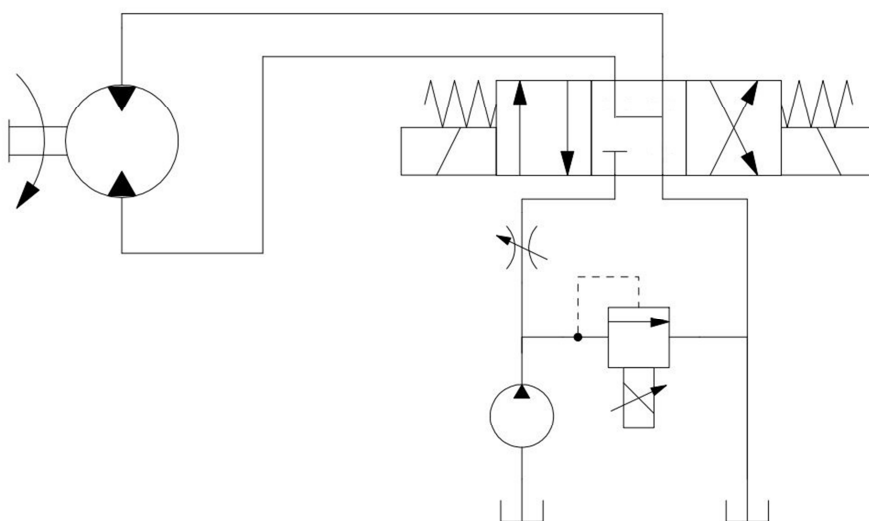


Figura 4.9: Grupo de Exercícios B – Circuito hidráulico

O presente grupo de exercícios encontra-se dividido da seguinte forma:

- **Exercício B.1** – Neste exercício, é medida a velocidade de rotação e calculado o caudal envolvido em cada movimento do motor.
- **Exercício B.2** – Neste exercício, o motor roda até que um ângulo previamente definido seja atingido e inverte o sentido até regressar ao mesmo ângulo inicial. Terminado o movimento, o utilizador deve avaliar as eventuais imprecisões ou dificuldades na obtenção do posicionamento final.
- **Exercício B.3** – Por forma a perceber melhor as imprecisões no posicionamento do motor no exercício B.2, o motor é colocado em rotação até que um determinado número de dentes da roda dentada acoplado ao veio do motor seja detetado pelo detetor de proximidade. Quando esse número de dentes for atingido, é dada a instrução para parar o movimento e é determinado o número de dentes avançados a partir desse momento (sobrecurso).

Tal como no grupo de exercícios anterior, antes de ser possível seleccionar algum dos exercícios que compõem este grupo, surge um conjunto de exercícios onde é possível ler informações sobre o grupo, verificar o circuito hidráulico e ligar a central (Anexo A).

4.2.1. Análise Prévia do Circuito Hidráulico

Observando o circuito hidráulico deste grupo de exercícios, pode-se observar que a válvula estranguladora de caudal está colocada em “Meter-In”, ou seja, estrangula o caudal na linha P. Assim sendo, a queda de pressão (Δp) no estrangulador é igual à pressão máxima admissível no circuito ($\Delta p = p_{Bomba}$).

Sabe-se que o caudal que atravessa um estrangulador é função da raiz quadrada da queda de pressão através deste, isto é:

$$Q = K \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad \text{Onde: } K = C_d \cdot A \quad (14)$$

Assim sendo, quanto maior for o nível de estrangulamento, menor é o valor de K .

Por outro lado, a velocidade de rotação do motor é dada pela razão entre o caudal que o atravessa cada movimento e a sua cilindrada:

$$n = \frac{Q}{C} \Leftrightarrow n = \frac{K}{C} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (15)$$

Concluindo, a velocidade de rotação, para um determinado caudal e para um binário externo nulo, é apenas função da cilindrada do motor e do nível de estrangulamento na válvula estranguladora de caudal.

4.2.2. Exercício B.1

Neste exercício o motor hidráulico bidirecional é colocado em rotação e é medida a velocidade de rotação bem como determinado o caudal envolvido no movimento.

Acoplado ao veio do motor encontra-se uma roda dentada com 12 dentes. Quando o motor é colocado em movimento, o sinal proveniente do detetor indutivo sofrerá uma transição ascendente por cada dente detetado. Assim sendo, uma rotação completa do motor corresponderá a 12 transições ascendentes do sinal proveniente do detetor.

Por forma a calcular a velocidade de rotação do motor em dentes por segundo, com um erro inferior a 1% e sabendo que o temporizador utilizado para medição indireta velocidade possui uma base temporal de 10 ms, surgem duas formas distintas para cálculo da velocidade de rotação:

- **Velocidades Rápidas:** $t = 1 \text{ [s]} \wedge n^\circ \text{ dentes} > 100$ (tempo fixo)
- **Velocidades Lentas:** $t > 1 \text{ [s]} \wedge n^\circ \text{ dentes} > 1$ (n° dentes fixo)

Por outro lado, dado que a velocidade de rotação será apresentada ao utilizador em [RPM], e uma vez que o fator de conversão de velocidade em [dentes/s] para [RPM] é igual a 5, o erro é ampliado para 5%. Assim sendo, para reduzir o mais possível este erro, são realizados 5 cálculos de velocidade de rotação do motor e determinada a média da velocidade.

4.2.2.1. Interface Homem-Máquina

Antes de se tornar possível a realização do exercício, surge uma janela introdutória com informações do exercício (Anexo A).

De seguida, surge a seguinte sequência de janelas:



Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início do exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados são exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

4.2.2.2. Resultados Obtidos

Foram realizados 3 exercícios B.1, para diferentes estrangulamentos, e obtiveram-se os seguintes resultados:

- **Determinação da Velocidade de Rotação para um Estrangulamento “Nulo”**

Foi realizado um exercício C.1, sem qualquer estrangulamento na válvula, de onde resultou uma velocidade de rotação de 319 [RPM]. Assim sendo, o tempo que uma rotação demora a ser efetuada é de 0,19 [s] e o caudal envolvido no movimento de 6,4 [l/min].

- **Determinação da Velocidade de Rotação para um Estrangulamento “Médio”**

De seguida, determinou-se a velocidade para um nível de estrangulamento na válvula médio, de onde resultou uma velocidade de rotação de 181 [RPM], ou seja, um tempo de uma rotação de 0,33 [s] e um caudal de 3,6 [l/min].

- **Determinação da Velocidade de Rotação para um Estrangulamento “Grande”**

Por fim, realizou-se um exercício com um nível de estrangulamento grande na válvula, resultando numa velocidade de rotação 14 [RPM], isto é, um tempo de uma rotação de 4,16 [s] e um caudal envolvido no movimento de 0,2 [l/min].

Ou seja, neste exercício, é possível determinar, rapidamente e com boa repetibilidade, a velocidade para toda a gama de velocidades de rotação do motor hidráulico na banca didática (equipada com uma central hidráulico com debito de 6,5 [l/min]).

4.2.3. Exercício B.2

Neste exercício, são analisadas as consequências do tempo de resposta do circuito hidráulico.

Para isso, o motor movimenta-se até que um ângulo, definido inicialmente, seja atingido. Após este instante o motor para e de seguida inverte o sentido de rotação até que a mesma posição angular seja atingida.

Se a ordem de paragem e de inversão do sentido do motor fosse imediata, o exercício terminaria com o motor na mesma posição de onde partiu. Uma vez que estas ordens não são imediatas, devido à dinâmica do autómato e da válvula irão ocorrer, em ambos os movimentos do motor, erros de posicionamento, nomeadamente, para velocidades de rotação elevadas (baixo estrangulamento na válvula estranguladora de caudal).

Assim sendo, no final de cada exercício, a escala graduada acoplada ao motor deve ser verificada pelo utilizador e analisado o erro de posicionamento angular do motor.

4.2.3.1. Interface Homem-Máquina

Inicialmente, surge uma janela com diversas informações sobre este exercício. De seguida, surge uma outra janela através da qual se deve posicionar o motor por forma a que um traço da escala graduada esteja alinhada com o detetor (Anexo A).

Posicionado o motor, é agora possível realizar o exercício. Surge então o seguinte conjunto de janelas:



Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo o botão “Incremento” e “Decremento” define-se o ângulo de rotação, de 30 em 30°;
- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, surge a mensagem: “Agora, verifique, no disco graduado, se o ângulo de início é igual ao ângulo final.”;
- Premindo em “Novo” retorna à janela de posicionamento do motor.

4.2.3.2. Resultados Obtidos

Para os mesmos níveis de estrangulamento do exercício B.1, foram realizados 3 exercícios. Os resultados obtidos e sua análise apresentam-se abaixo.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Nulo”**

Para a velocidade de 312 [RPM], determinada no exercício B.1, obtiveram-se neste exercício erros de posicionamento de 30°, para qualquer ângulo definido para o movimento. Embora este valor seja repetível, como é evidente, não está sendo efetuado um posicionamento com erro nulo.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Médio”**

Da mesma forma, foi realizado um exercício com um estrangulamento médio, de onde resulta uma velocidade de rotação de 181 [RPM] (determinada em B.1). Para esta velocidade, tal como no movimento anterior, obtiveram-se erros de posicionamento igualmente na ordem de 30°, para qualquer ângulo definido para o movimento.

- **Movimentos para um Estrangulamento “Grande”**

Por fim, foi realizado um exercício com um estrangulamento grande na válvula, de onde resultou uma velocidade de rotação de 14,4 [RPM]. Para esta velocidade, obteve-se sucessivos erros de posicionamento nulos, para qualquer ângulo de movimento definido.

Assim sendo, é possível concluir que para caudais pequenos, não existem imprecisões no posicionamento do motor. No entanto, para velocidades elevadas os erros de posicionamento rodam os 30°. Esses erros serão analisados mais à frente nesta secção.

4.2.4. Exercício B.3

Por forma a avaliar melhor os erros de posicionamento angular do motor, descritos no exercício B.2, neste exercício, o motor roda até que um número de dentes da roda dentada acoplada ao motor, definido previamente, seja detetado pelo detetor indutivo. Atingido esse valor, será dada a instrução para desatuação da válvula e, após esse momento, são contados os dentes avançados.

Assim sendo, pode-se afirmar, *à priori*, que quanto maior for o caudal fornecido ao motor, maior será o número de dentes de sobrecurso após a ordem de paragem, uma vez que, para elevadas velocidades de rotação, os erros temporais associados à dinâmica do autómato e da válvula tornam-se mais evidentes.

4.2.4.1. Interface Homem-Máquina

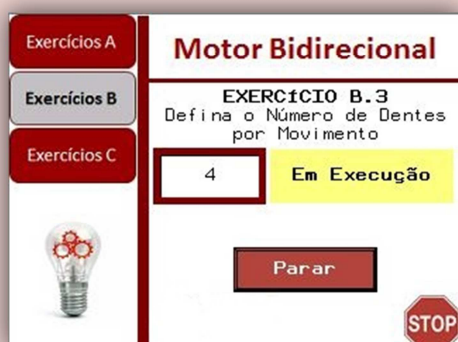
Tal como nos exercícios anteriores, quando selecionado este exercício surge uma janela com diversas informações do exercício (Anexo A).

Após esta janela, é possível realizar o exercício.



Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo o botão “Incremento” e “Decremento” define-se o número de dentes por movimento;
- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, surge o sobrecurso obtido;
- Premindo em “Novo” é possível realizar um novo exercício.

4.2.4.2. Resultados Obtidos

Para os mesmos níveis de estrangulamento dos exercícios analisados anteriormente foram realizados 3 exercícios B.3. Os resultados apresentam-se abaixo.

- **Movimento para um Estrangulamento “Nulo”**

Para uma velocidade de rotação de 312 [RPM] (determinada em B.1), obtiveram-se sobrecursos de cerca de 6 dentes, isto é, cerca de 180°. Estes valores devem-se sobretudo ao tempo de resposta do circuito hidráulico e ao facto de a válvula utilizada neste exercício ser de centro “Y” A-B-T, o que significa que após a válvula retornar à posição central, ainda algum caudal é encaminhado para o reservatório, o que tem como consequência a ocorrência de um sobrecurso do motor hidráulico.

- **Movimento para um Estrangulamento “Médio”**

Para uma velocidade de rotação de 181 [RPM] (determinada em B.1), obtiveram-se sobrecursos de cerca de 4 dentes, isto é, cerca de 120°. Os motivos que levam à ocorrência deste sobrecurso são os mesmos apresentados na análise do movimento anterior, isto é, devem-se ao tempo de resposta do circuito e à configuração da válvula.

No entanto, para este estrangulamento, obtiveram-se sobrecursos inferiores aos obtidos no movimento anterior.

- **Movimento para um Estrangulamento “Grande”**

Por fim, para um estrangulamento elevado, donde resulta uma velocidade de rotação de 14 [RPM], o sobrecurso do motor hidráulico obtido é praticamente nulo.

Assim se pode concluir que quanto menor a velocidade de rotação do motor (caudal envolvido no movimento), menores são os sobrecursos obtidos e, para velocidades muito pequenas, este é praticamente nulo.

4.2.1. Apreciação Geral dos Resultados

Agora é feita uma apreciação geral dos resultados dos exercícios que compõem o grupo de exercícios B.

Para velocidades muito elevadas, isto é, para caudais muito elevados, obtêm-se erros de posicionamento do motor hidráulico, como se pode observar nos resultados dos exercícios B.2. Este erros, devem-se sobretudo ao sobrecurso do motor hidráulico que é tanto maior quanto maior forem os caudais envolvidos nos movimentos, como é possível comprovar na análise dos resultados do exercício B.3.

Por outro lado, para velocidades muito baixas, isto é, para caudais muito baixos, os erros de posicionamento do motor verificados no exercício B.2, são praticamente nulos. Este erro nulo deve-se sobretudo ao sobrecurso nulo do motor para velocidades baixas, como se pôde verificar no exercício B.3.

Por fim, conclui-se no exercício B.3 que parte do sobrecurso se deve à utilização de uma válvula de centro “Y” A-B-T que, após o retorno da válvula à sua posição central, permite a passagem de algum caudal para o reservatório. Assim sendo, parte desse sobrecurso poderia ser eliminado com a utilização de uma válvula direcional com centro A-B fechados.

4.3. Grupo de Exercícios C – Dinâmica de Válvulas Direcionais

Este grupo é constituído por 3 exercícios onde se pretende determinar os tempos de comutação de válvulas direcionais.

De uma forma genérica, o circuito hidráulico deste conjunto de exercícios é composto pela válvula direcional em análise e por dois pressostatos, como se pode observar na figura abaixo apresentada.

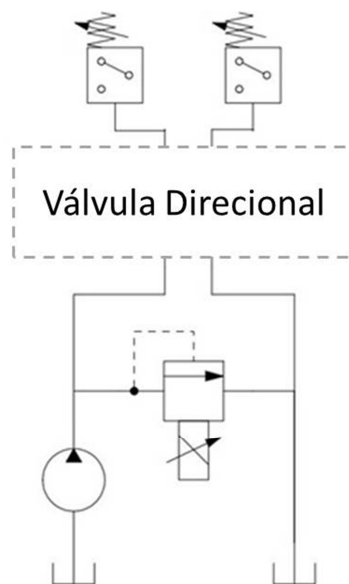


Figura 4.10: Grupo de Exercícios C – Circuito hidráulico genérico

Assim sendo, o tempo de comutação da válvula, para cada uma das suas posições, será o tempo decorrido entre o comando dado pelo autómato e a ativação do respetivo pressostato.

O presente grupo encontra-se dividido da seguinte forma:

- **Exercício C.1** – Determinação dos tempos de comutação de válvulas 4/3 com centragem por molas;
- **Exercício C.2** – Determinação dos tempos de comutação de válvulas 4/2 monoestáveis;
- **Exercício C.3** – Determinação dos tempos de comutação de válvulas 4/2 biestáveis.

Na interface, antes de ser possível selecionar qualquer um dos exercícios, surge uma janela com uma breve descrição deste grupo (Anexo C).

4.3.1. Exercício C.1

Neste exercício pretendem-se medir os tempos de comutação de uma válvula direcional 4/3 com centragem por molas. O circuito hidráulico deste exercício encontra-se abaixo apresentado.

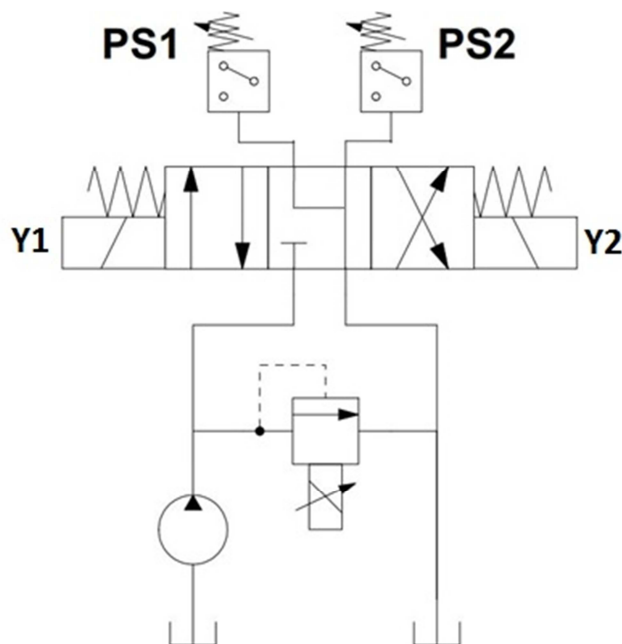


Figura 4.11: Exercício C.1 - Circuito hidráulico

Como já foi referido anteriormente, os tempos de comutação da válvula são os tempos decorridos entre o momento em que é dada a instrução de comutação e a transição ascendente do respetivo pressostato. Na figura abaixo apresentada, encontra-se o diagrama temporal característico deste exercício.

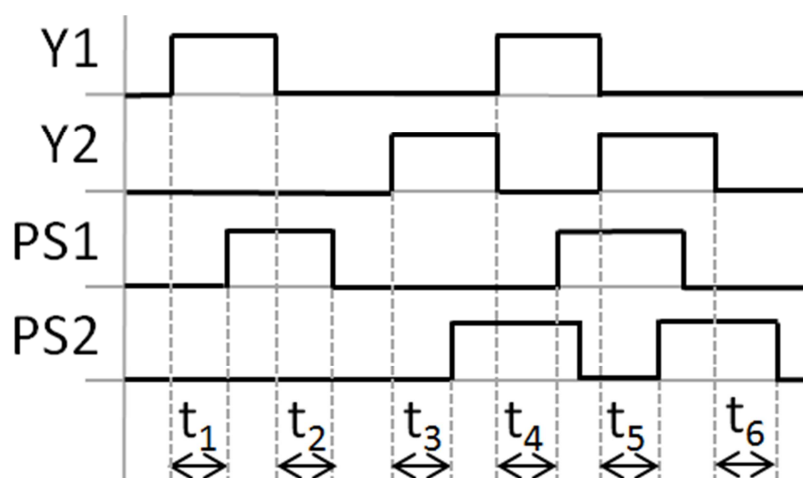


Figura 4.12: Exercício C.1 - Diagrama temporal

Observando o diagrama temporal que caracteriza este exercício, verifica-se que este decorre pela seguinte ordem:

- A válvula é comutada para a posição P-A/B-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS1 (t_1);
- A válvula retorna a sua posição central e é medido o tempo decorrido entre a desenergização do solenóide e a transição descendente do pressostato PS1 (t_2);
- A válvula é comutada para a posição P-B/A-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS2 (t_3);
- A válvula é comutada para a posição P-A/B-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS1 (t_4);
- A válvula é comutada para a posição P-B/A-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS2 (t_5);
- A válvula retorna a sua posição central e é medido o tempo decorrido entre a desenergização do solenóide e a transição descendente do pressostato PS2 (t_6);

Em suma, este exercício divide-se na medição do tempo de comutação da válvula da posição central para as suas posições extremas (t_1 e t_3), do tempo de comutação entre as suas posições extremas (t_4 e t_5) e do tempo do retorno à posição central (t_2 e t_6).

4.3.1.1. Interface Homem-Máquina

Para ser possível realizar o exercício, surge na interface um conjunto de janelas onde é possível ler informações relevantes, verificar o circuito e ligar a central (Anexo A).

Verificado o circuito e ligada a central, torna-se possível realizar o exercício. Assim sendo, surge a seguinte sequência de janelas:



Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados são exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

4.3.1.2. Resultados Obtidos

Realizaram-se 5 exercícios C.1, à pressão de 50 [bar], utilizando a eletroválvula direcional 4/3 de centro A-B-T da *Vickers*. Os tempos de comutação da válvula obtidos encontram-se na tabela abaixo apresentada.

| | t_1 [ms] | t_2 [ms] | t_3 [ms] | t_4 [ms] | t_5 [ms] | t_6 [ms] |
|--------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Exercício 1 | 136 | 70 | 170 | 190 | 150 | 85 |
| Exercício 2 | 130 | 70 | 170 | 180 | 150 | 85 |
| Exercício 3 | 140 | 60 | 170 | 180 | 150 | 90 |
| Exercício 4 | 133 | 70 | 170 | 180 | 153 | 90 |
| Exercício 5 | 130 | 70 | 170 | 176 | 151 | 80 |

Tabela 4.12: Resultados do exercício C.1

Pela análise dos valores acima apresentados é possível concluir que, a válvula demora, em média, 152 [ms] para comutar da posição central para qualquer uma das suas posições extremas. Por sua vez, o retorno por mola à sua posição central ocorre em cerca de 77 [ms], ou seja, cerca de 50 % mais rápido.

Por fim, a comutação de uma posição extrema para a outra, ocorre, em média, em cerca de 166 [ms], o que não é significativamente diferente da comutação da posição central para qualquer uma das posições extremas.

4.3.2. Exercício C.2

Neste exercício pretende-se medir os tempos de comutação de uma válvula direcional 4/2 monoestável. O circuito hidráulico deste exercício encontra-se abaixo apresentado.

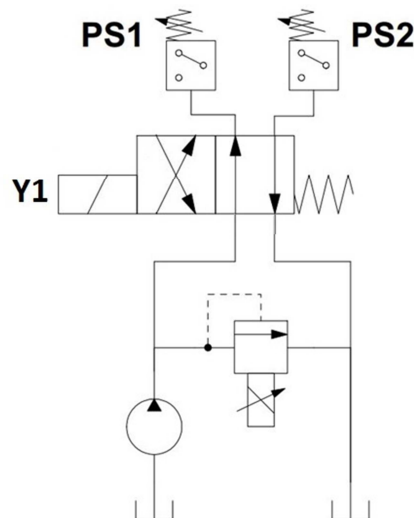


Figura 4.13: Exercício C.2 - Circuito hidráulico

Os tempos de comutação da válvula, para cada uma das suas posições são os tempos decorridos entre a ordem de comutação e a transição ascendente do respetivo pressostato. Abaixo, encontra-se o diagrama temporal característico deste exercício.

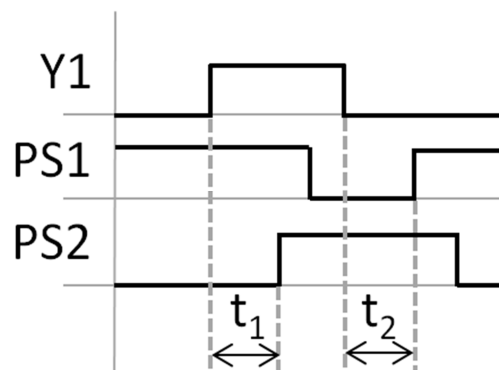


Figura 4.14: Exercício C.2 - Diagrama temporal

Assim sendo, o exercício é constituído pelas seguintes etapas:

- O solenóide S1 é alimentado, e válvula comuta para a posição P-A/B-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS2 (t_1);

- O solenóide S1 deixa de ser alimentado, e a válvula regressa para a posição P-B/A-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS1 (t_2).

4.3.2.1. Interface Homem-Máquina

Selecionando este exercício, surge um conjunto de janelas, onde é possível ler informações relevantes, verificar o circuito hidráulico e ligar a central (Anexo A). Após isto, surge a seguinte sequência de janelas:



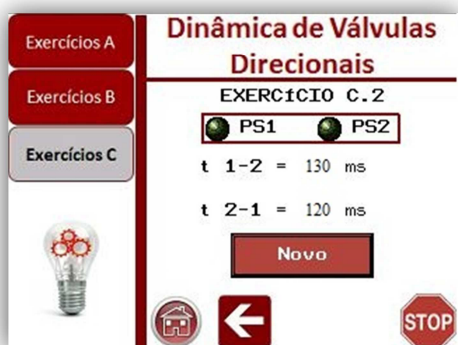
Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados serão exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

4.3.2.2. Resultados Obtidos

Realizaram-se 5 exercícios C.2, á pressão de 50 [bar], utilizando a eletroválvula direcional 4/2 monoestável da *Vickers*. Os tempos de comutação obtidos encontram-se na tabela abaixo.

| | t_1 [ms] | t_2 [ms] |
|--------------------|------------|------------|
| Exercício 1 | 130 | 120 |
| Exercício 2 | 133 | 116 |
| Exercício 3 | 136 | 120 |
| Exercício 4 | 130 | 120 |
| Exercício 5 | 136 | 119 |

Tabela 4.13: Resultados do exercício C.2

Analisando os valores obtidos, verifica-se que, em média, a válvula demora 133 [ms] a comutar, o que não difere muito do valor de comutação obtido no exercício C.2 (152 [ms]), uma vez que os eletroímãs que equipam estas válvulas são idênticos. Por outro lado, o retorno por mola é de cerca de 119 [ms], ou seja, cerca de 10 % mais rápido. Verifica-se ainda que o tempo de retorno por mola é maior do que o obtido no exercício C.1.

Uma válvula direcional 4/2 é construtivamente semelhante a uma válvula direcional 4/3, isto é, o curso total e configuração da gaveta são semelhantes, possuindo na prática, o mesmo número de posições.

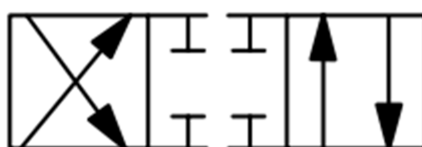


Figura 4.15: Exercício C.2 - Gaveta da Válvula Direcional 4/2

A grande diferença existente entre elas, é o facto de a válvula 4/3 comutar entre a posição central e qualquer uma das suas posições extremas e a válvula direcional 4/2 apenas comutar entre as suas posições extremas.

Assim sendo, na válvula 4/2 o curso da gaveta no retorno por mola é maior que o curso da gaveta da válvula 4/3 na centragem por molas, o que justifica o facto de os tempos de retorno da válvula aqui analisada ser maior que o tempo de retorno obtido na válvula 4/3.

4.3.3. Exercício C.3

Neste exercício são medidos os tempos de comutação de uma válvula direcional 4/2 biestável. O circuito hidráulico deste exercício encontra-se abaixo apresentado.

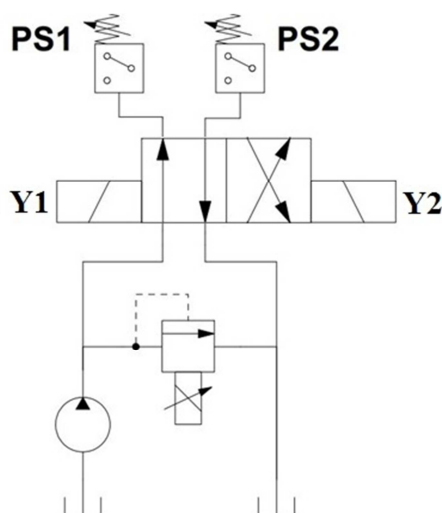


Figura 4.16: Exercício C.3 - Circuito Hidráulico

Antes de se iniciar o exercício, a válvula é colocada na posição P-A/B-T, por forma a garantir que cada exercício se inicie sempre com a válvula nesta posição. Feito isto, a válvula comuta entre as suas posições e são determinados os tempos de comutação desta. O diagrama temporal que caracteriza este exercício é abaixo apresentado.

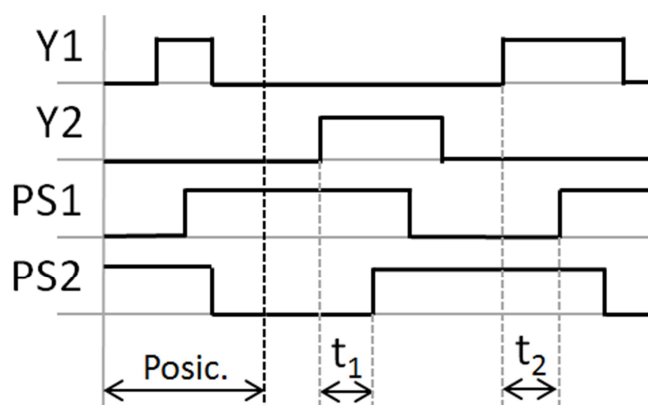


Figura 4.17: Exercício C.3 - Diagrama Temporal

Observando o diagrama temporal, conclui-se que o exercício decorre pela seguinte ordem:

- A válvula é comutada para a posição P-B A-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS2 (t_1);

- A válvula é comutada para a posição P-A B-T e é medido o tempo decorrido entre a comutação da válvula e a transição ascendente do pressostato PS1 (t_2).

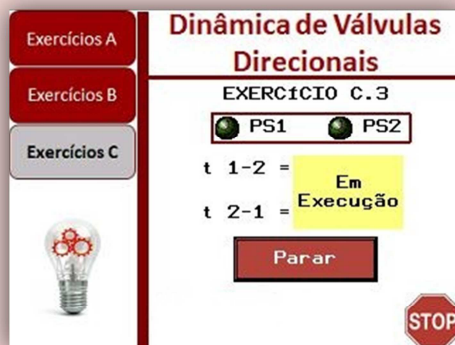
4.3.3.1. Interface Homem-Máquina

Selecionando este exercício, surge um conjunto de janelas, onde é possível ler informações relevantes, verificar o circuito hidráulico e ligar a central (Anexo A). Após isto, surge a seguinte sequência de janelas:



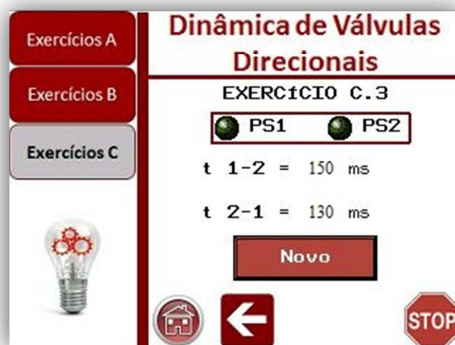
Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução”;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados serão exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

4.3.3.2. Resultados Obtidos

Por fim, realizaram-se 5 exercícios C.3, nas mesmas condições, utilizando a eletroválvula direcional 4/2 biestável da *Vickers*. Os resultados obtidos encontram-se expressos na tabela abaixo apresentada.

| | t_1 [ms] | t_2 [ms] |
|--------------------|------------|------------|
| Exercício 1 | 150 | 136 |
| Exercício 2 | 150 | 130 |
| Exercício 3 | 150 | 130 |
| Exercício 4 | 150 | 130 |
| Exercício 5 | 150 | 136 |

Tabela 4.14: Resultados do exercício C.3

Em média, a válvula demora cerca de 141 [ms] a comutar para qualquer uma das suas posições extremas, o que não difere muito dos tempos de comutação obtidos nos exercícios C.1 e C.2, dado que os solenoides que equipam as válvulas são idênticos.

4.3.4. Apreciação Geral dos Exercícios

Agora é feita uma apreciação geral dos resultados dos exercícios que compõem o grupo de exercícios C.

Com a realização dos exercícios deste grupo, e uma vez que os eletroímãs que equipam cada uma das válvulas analisadas é idêntico, é possível verificar que independentemente do número de posições que a eletroválvula direcional possui, os tempos de comutação da válvula são idênticos.

Por outro lado, é também possível concluir que o retorno por mola faz-se mais rapidamente do que a comutação da eletroválvula por eletroíman.

Por fim, é de salientar que os tempos de comutação das eletroválvulas vêm afetados por imprecisões na aquisição dos tempos de comutação (devido ao tempo de ciclo do autómato) e pelo tempo de pressurização/despressurização das linhas para os pressostatos.

5. Exercícios Didáticos de Hidráulica Proporcional

No presente capítulo, apresentam-se 2 grupos de exercícios automatizados que permitem a demonstração de comportamentos e características de sistemas óleo-hidráulicos usando elementos de hidráulica proporcional. Assim sendo, distinguem-se os seguintes grupos:

- **Grupo de Exercícios D:** exercícios para a determinação do módulo de compressibilidade do fluido óleo-hidráulico e avaliação das fugas por uma válvula;
- **Grupo de Exercícios E:** exercícios para avaliação das vantagens e características da utilização da hidráulica proporcional no controlo de pressão e velocidade de um atuador;

Nos exercícios que constam deste capítulo, foi utilizada uma válvula limitadora de pressão proporcional da *Rexroth* como dispositivo de controlo de pressão do sistema.

É de referir que, todos os exercícios foram programados no autómato tendo por base os *Grafcet's* funcionais disponíveis no anexo C e usando as 'Instruções de *Grafcet*', que é um método disponibilizado pelo *TwidoSuite* para implementação destes.

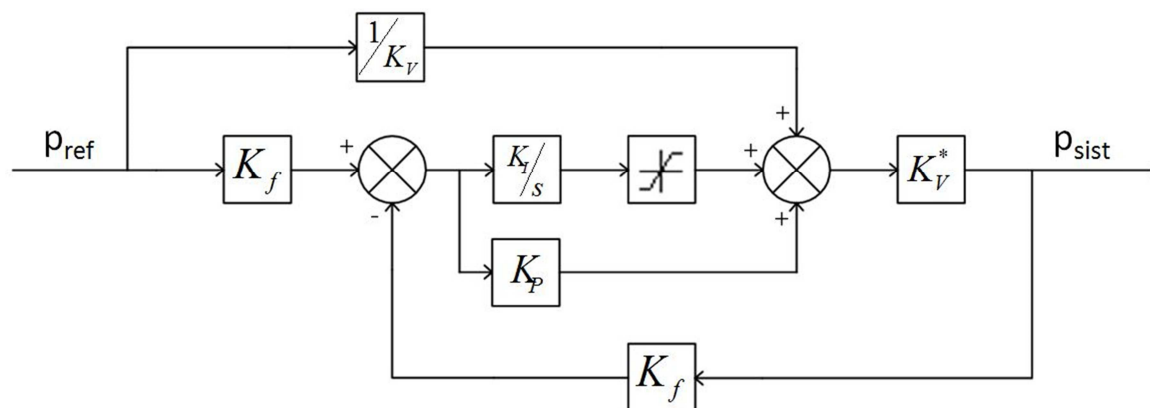
Ao longo deste capítulo, será feita uma análise das soluções de controlo usadas, bem como, a descrição dos exercícios e analisados os resultados de cada um deles. Também é feita uma breve descrição da integração destes na interface homem-máquina.

5.1. Controlos Desenvolvidos

5.1.1. Controlo de Pressão

Em alguns dos exercícios utilizando hidráulica proporcional é necessário um controlo de pressão. Como a grandeza de pressão é controlada diretamente por uma válvula hidráulica de comando elétrico, usou-se uma ação de controlo por “*Feedforward*” como primeira aproximação ao controlo da pressão. O elemento de comando utilizado foi uma válvula limitadora de pressão proporcional da *Rexroth*. Em complemento, foi desenvolvida uma malha de controlo por “*feedback*” usando como elemento de *feedback* o transdutor de pressão instalado na banca.

O diagrama de blocos que caracteriza este sistema de controlo apresenta-se na figura abaixo.



Legenda:

p_{Ref} – pressão de referência / p_{Sist} – pressão no sistema / K_p – ganho proporcional
 K_i – ganho integral / K_f – ganho de *feedback* / K_v – ganho da válvula

Figura 5.1: Diagrama de blocos do controlo de pressão

Como se pode observar na malha de controlo acima apresentada, quando é definida uma pressão de referência para o sistema hidráulico, é aplicada de imediato uma tensão na válvula limitadora de pressão proporcional baseada na curva característica desta.

A curva característica da válvula é, no entanto, influenciada quer pelo caudal que a atravessa quer pela temperatura do fluido óleo-hidráulico, pelo que a malha fechada vem compensar essencialmente esses desvios da característica.

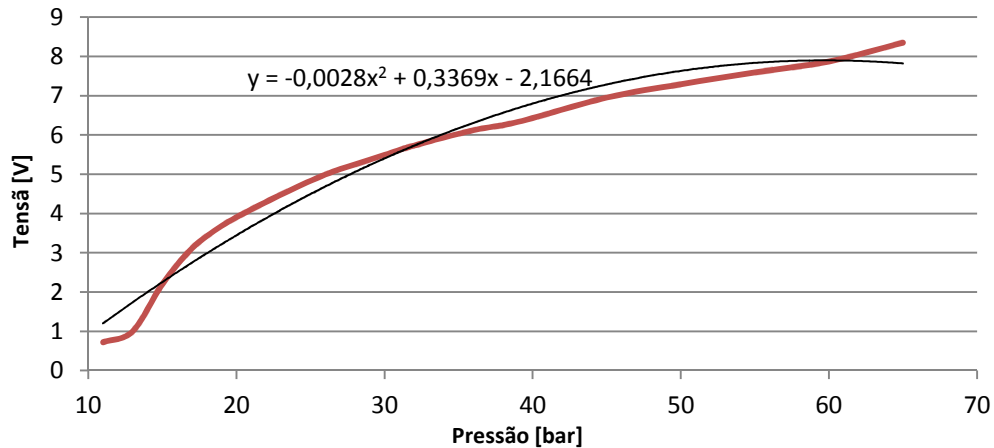
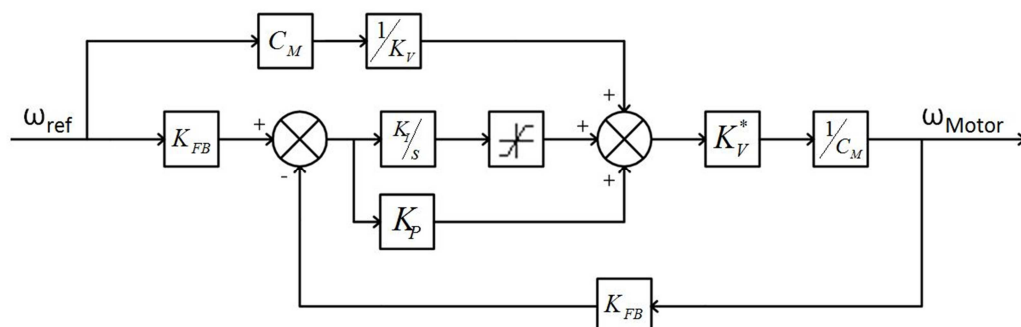


Figura 5.2: Inversa da curva característica experimental da válvula limitadora de pressão proporcional

Sendo este sistema do tipo 0, foi introduzida uma ação de controlo proporcional e integral (PI), que assegura um erro nulo a referências de pressão constantes. O termo integral é sujeito a uma saturação do seu sinal de saída, que não permite que o sinal produzido por este exceda os $\pm 2V$ (20% do sinal máximo de comando da válvula). Esta limitação evita que a ação proveniente do controlo integral seja muito excessiva, minimizando assim uma eventual sobrelongação na resposta temporal.

5.1.2. Controlo de Velocidade de Rotação de Motor Hidráulico

Para controlo da velocidade de rotação do motor foi implementado no autómato uma ação de controlo “*Feedforward*”, uma vez que o elemento de comando utilizado foi uma válvula reguladora de caudal proporcional. Sendo esta válvula compensada à pressão, permite um controlo bem rigoroso do caudal, e portanto da velocidade do motor, para diferentes condições de carga. Em complemento, foi usada uma malha de “*feedback*”, tendo sido utilizado como elemento de *feedback* um taquímetro DC.



Legenda:

ω_{Ref} – velocidade de referência / ω_{Motor} – velocidade do motor
 C_M – cilindrada da bomba / K_p – ganho proporcional / K_i – ganho integral
 K_{FB} – ganho de *feedback* / K_m – ganho da válvula

Figura 5.3: Diagrama de blocos do controlo de velocidade de rotação do motor

Tal como no controlo de pressão, a ação de *feedforward* gera uma tensão na válvula reguladora proporcional baseada na curva característica desta (retirada para uma pressão do sistema de 20 [bar]).

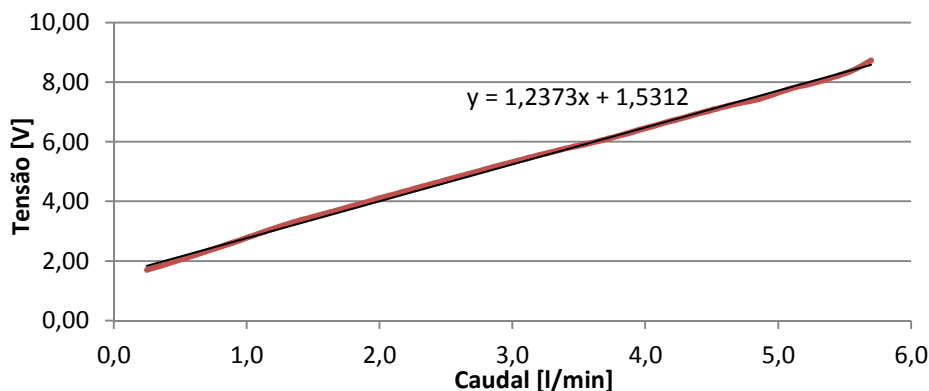
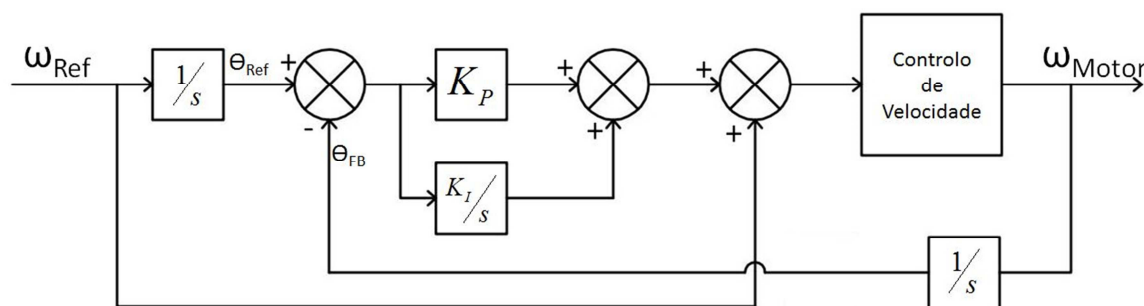


Figura 5.4: Inversa da curva característica experimental da válvula reguladora de caudal proporcional

Por outro lado, e sendo que este sistema é do tipo 0, foi ainda introduzida uma ação de controlo proporcional e integral (PI), que assegura um erro nulo a referências de pressão constantes. Existe ainda uma saturação à saída do controlo integral que não permite que a ação produzida por este exceda $\pm 2V$ (20% da ação máxima possível), evitando assim a sobrelongação.

5.1.3. Controlo de Posição do Motor Hidráulico

Por forma a ser possível controlar a posição do motor hidráulico para uma dada referência de velocidade de rotação, foi desenvolvido o controlo abaixo apresentado.



Legenda:

ω_{Ref} – velocidade de referência / Θ_{Ref} – referência de posição
 Θ_{FB} – *feedback* de posição / ω_{Motor} – velocidade do motor
 K_P – ganho Proporcional / K_I – ganho Integral

Figura 5.5: Controlo de posição do motor

Dado que o controlo de posição estará a gerar referências (com base na referência de velocidade e o erro de posição) para um outro controlo distinto (o controlo de velocidade) é possível afirmar que aqui se faz um controlo em cascata.

Falta ainda referir que, o *feedback* de posição será dado pelo par roda dentada/detector indutivo que equipa o motor hidráulico, e que, sendo este sistema do tipo 0, foi introduzida uma ação de controlo proporcional e integral (PI), que irá assegurar um erro nulo.

5.2. Grupo de Exercícios D – Módulo de Compressibilidade e Fugas por Válvula

Este grupo é constituído por dois exercícios que permitem determinar o módulo de compressibilidade de um fluido hidráulico, bem como, avaliar as fugas numa válvula direcional 4/3.

Assim sendo, e por forma a evitar que o utilizador tenha de montar dois circuitos hidráulicos distintos para cada um dos exercícios, optou-se pela utilização do mesmo circuito para ambos.

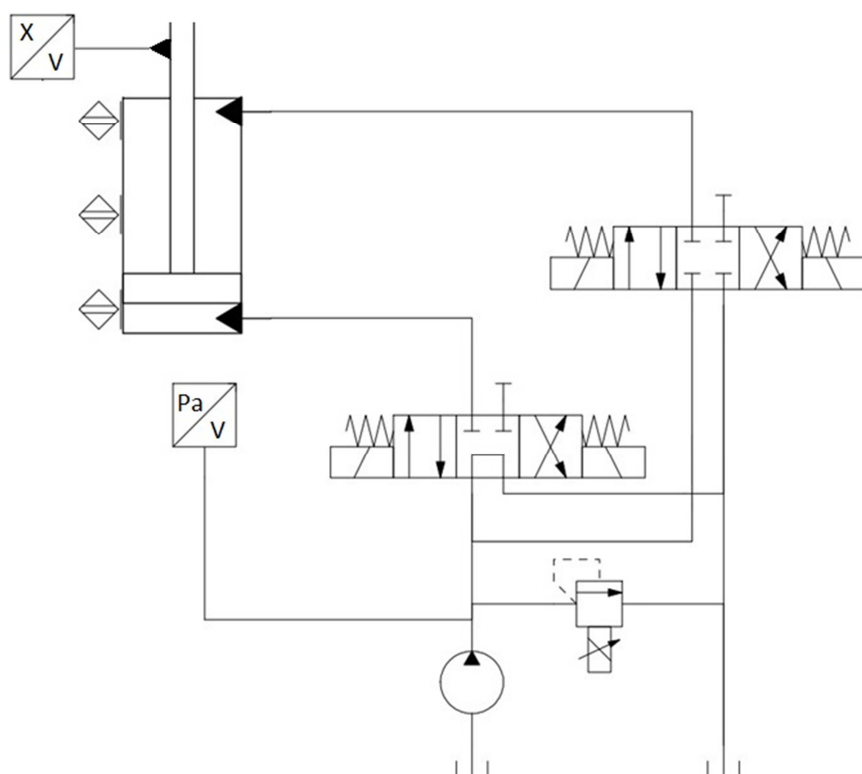


Figura 5.6: Grupo de Exercícios D - Circuito Hidráulico

Observando o circuito hidráulico acima apresentado, observa-se que este é constituído por um cilindro hidráulico de duplo efeito assimétrico, duas válvulas direcionais 4/3, uma válvula limitadora de pressão proporcional e por um transdutor de pressão analógico.

Acoplado à haste do cilindro encontra-se uma chapa metálica que, em conjunto com o transdutor analógico de proximidade, possibilita a medição do deslocamento da haste do cilindro. Ainda, acoplados ao cilindro, encontram-se três detetores de fim de curso (dois no curso máximo do cilindro e um a meio do curso).

O presente grupo encontra-se dividido da seguinte forma:

- **Exercício D.1** – Neste exercício é determinado experimentalmente o módulo de compressibilidade de um fluido hidráulico;

- **Exercício D.2** – Neste exercício serão avaliadas as fugas por uma válvula direcional 4/3 de centro fechado quando esta se encontra na sua posição central.

Quanto à forma de implementação deste grupo na interface Homem-Máquina, há inicialmente um conjunto de janelas onde é possível ver uma breve descrição do grupo, verificar o circuito hidráulico, ligar a central e selecionar um exercício (Anexo A).

5.2.1. Exercício D.1

O módulo de compressibilidade (β) é definido como a constante de proporcionalidade entre variação de volume (ΔV) que um determinado volume de fluido (V) sofre, e a variação de pressão (Δp) a que este volume é sujeito:

$$\Delta p = -\beta \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (16)$$

Para a implementação deste exercício utiliza-se um cilindro hidráulico de duplo efeito assimétrico, tomando como volume a ser comprimido o volume da sua câmara secundária. Assim sendo, antes da realização do exercício, o cilindro será posicionado a meio do seu curso e será retirada a mangueira de ligação da câmara secundária ao exterior, para que esta se encontre obturada.

Estando a câmara secundária do cilindro obturada e aumentando a pressão na câmara principal do cilindro consegue-se sujeitar o óleo contido na câmara secundária a uma pressão superior à pressão da câmara principal no valor da razão de áreas do cilindro, comprimindo assim este volume. A compressão do fluido presente na câmara secundária resultará num pequeno avanço incremental do cilindro que será medido recorrendo ao detetor analógico de proximidade.

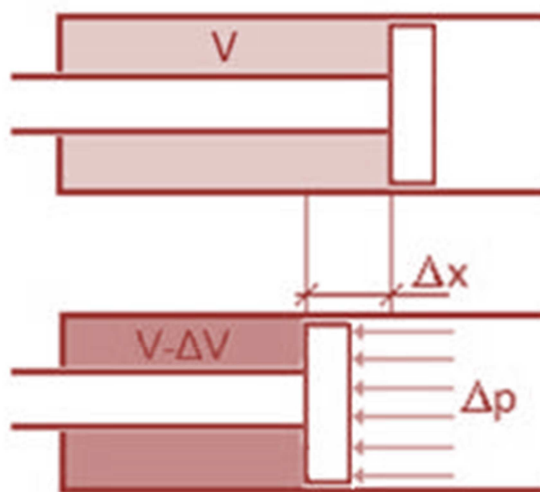


Figura 5.7: Compressão do volume de óleo presente na câmara secundária

Assim sendo, e considerando que l e x_0 representam o curso e posição inicial do cilindro, respetivamente, o volume contido na câmara secundária do cilindro hidráulico vem:

$$V = \frac{\pi(\phi_{\text{embolo}}^2 - \phi_{\text{haste}}^2)}{4} \cdot (l - x_0) \quad (17)$$

E, sabendo que a variação do volume contido na câmara secundária é dada pela expressão:

$$\Delta V = - \frac{\pi(\phi_{\text{embolo}}^2 - \phi_{\text{haste}}^2)}{4} \cdot \Delta x \quad (18)$$

Tem-se que o módulo de compressibilidade médio do fluido será dado pela seguinte expressão:

$$\beta = (l - x) \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad (19)$$

Por forma a determinar a curva de compressibilidade do fluido em estudo, ao longo do exercício, são feitos incrementos de pressão (com recurso ao controlo de pressão – Ver secção 5.1) na câmara principal do cilindro e registados os valores de deslocamento do cilindro e os valores de pressão na câmara secundária (igual à pressão na câmara principal do cilindro multiplicada pela razão de áreas).

5.2.1.1. Interface Homem-Máquina

Antes de se tornar possível a realização do exercício, surge um conjunto de janelas introdutórias onde é possível ler um conjunto de informações sobre este, bem como, posicionar o cilindro (Anexo A).

Após isto, surge a seguinte sequência de janelas:



Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução” e são exibidas as pressões em ambas as câmaras do cilindro, bem como o deslocamento atual do êmbolo;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados são exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

5.2.1.2. Resultados Obtidos

Realizou-se o exercício D.1 (exercício para determinação experimental do módulo de compressibilidade) e obteve-se o gráfico abaixo apresentado.

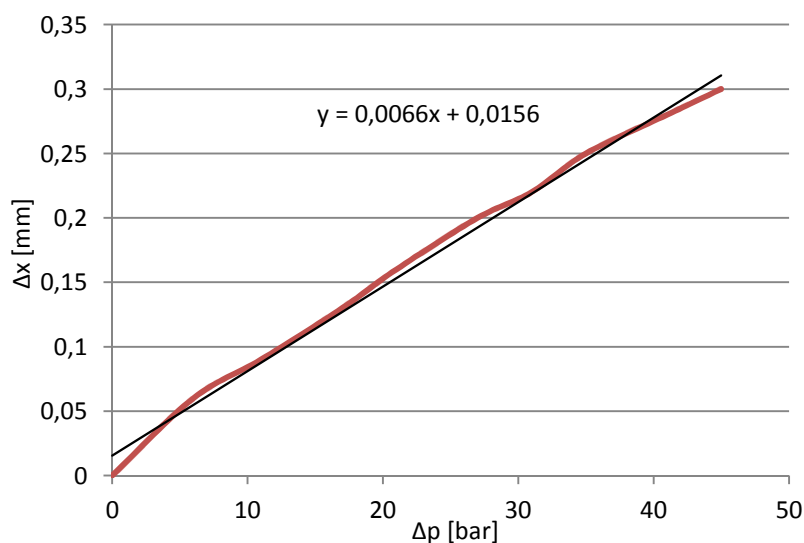


Figura 5.8: Resultados do exercício D.1

Tendo em conta a equação da reta de regressão linear obtida e sabendo que o êmbolo do cilindro no início do exercício se encontra a meio do curso do cilindro ($x_0=50$ [mm]), é possível calcular o módulo de compressibilidade do fluido hidráulico:

$$\beta = (100 - 50) \cdot \frac{1}{0,0066} = 7576 \text{ [bar]} \quad (20)$$

Pode-se verificar que o valor obtido do módulo de compressibilidade difere do valor de referência (10000 [Bar]). Esta diferença pode dever-se à existência de bolhas de ar, bem como, à própria deformação do corpo do cilindro durante o exercício (corpo em alumínio).

Outra razão para o valor obtido diferir do valor de referência é o facto de o exercício ser realizado a baixas pressões ($p_{\text{máxima}}=75$ [bar]), isto é, à medida que a pressão aumenta, o sistema torna-se mais rígido o que significa que o módulo de compressibilidade aumenta com o aumento de pressão.

5.2.2. Exercício D.2

No presente exercício, são avaliadas as fugas por uma válvula direcional 4/3 de centro fechado quando esta se encontra na sua posição central.

Este tipo de válvulas tem uma gaveta de translação como solução construtiva devido à simplicidade de construção. No entanto, estas válvulas apresentam problemas de estanqueidade interna, ou seja, no isolamento das câmaras internas ligadas aos diferentes orifícios. Assim sendo, a estanqueidade é influenciada por fatores de natureza construtiva da válvula, folga radial entre o corpo da válvula e a gaveta e o recobrimento existente.

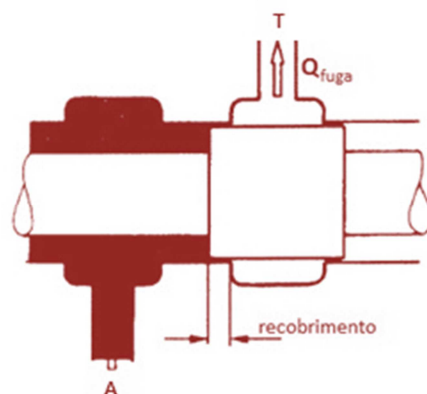


Figura 5.9: Representação de válvula direcional de gaveta de translação

Uma vez que o escoamento de fugas entre as câmaras ocorre a velocidades muito baixas, pode-se assumir que tem um comportamento laminar e, sendo assim, a estanqueidade de cada uma das câmaras é linearmente dependente de fatores como a viscosidade do fluido hidráulico (função da temperatura) e da queda de pressão entre as câmaras adjacentes.

Neste exercício, recorrer-se-á a um cilindro de duplo efeito assimétrico para avaliação das fugas de uma válvula direcional 4/3 de centro fechado.

O caudal perdido por fugas na válvula resultará numa diminuição do volume de óleo contido na câmara secundária do cilindro o que se traduzirá num deslocamento do cilindro. Conhecendo então a variação de posição (Δx), o tempo decorrido entre medições (Δt) e as áreas do êmbolo e da haste do cilindro, é possível calcular o caudal de fugas pela válvula pela seguinte expressão:

$$Q_{fuga} = A \cdot v \Leftrightarrow Q_{fuga} = \frac{\pi(\phi_{\text{êmbolo}}^2 - \phi_{\text{haste}}^2)}{4} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (21)$$

O facto de se estar a usar um cilindro hidráulico para determinar o caudal de fugas é particularmente interessante, uma vez que é possível impor uma pressão na

câmara secundária utilizando a câmara principal. Assim sendo, durante o exercício, são feitos incrementos de pressão na câmara principal do cilindro, recorrendo ao controlo de pressão (ver secção 5.1).

5.2.2.1. Interface Homem-Máquina

Inicialmente, surge um conjunto de janelas introdutórias com diversas informações sobre o exercício e onde é possível posicionar o cilindro hidráulico a meio do seu curso (Anexo A).

Após isto, surge a seguinte sequência de janelas de realização do exercício:



Janela 1 – Início do Exercício

- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 2 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução” e serão exibidas as pressões em ambas as câmaras do cilindro;
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.



Janela 3 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados são exibidos;
- Premindo em “Novo” inicia-se um novo exercício.

5.2.2.2. Resultados Obtidos

Após a realização do exercício D.2 (exercício para avaliação de fugas por uma válvula direcional 4/3 de centro fechado), os resultados foram tratados, obtendo-se o gráfico abaixo apresentado.

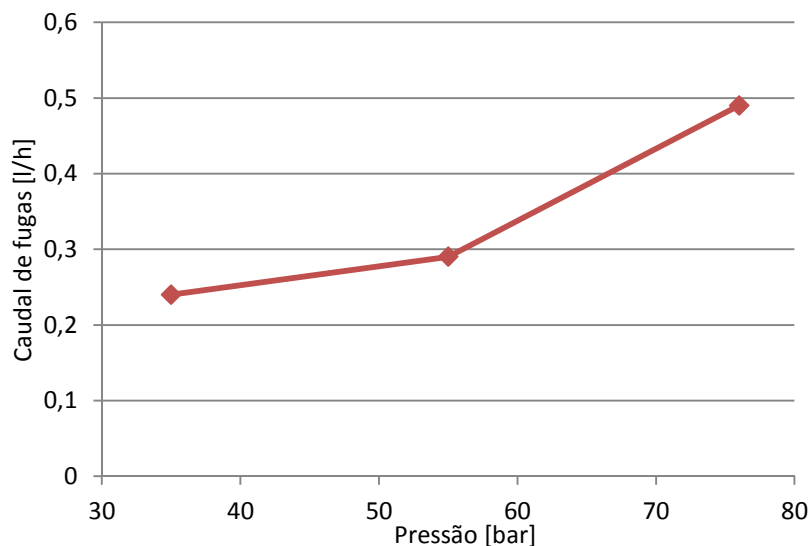


Figura 5.10: Resultados do exercício D.2

O caudal de fugas aqui apresentado é a soma entre a fuga de A-T e o caudal de fugas de A-P (esta fuga deve-se ao facto de a pressão no orifício A ser superior, na razão de áreas do cilindro, à pressão no orifício P). Estas fugas encontram-se representadas na figura abaixo.

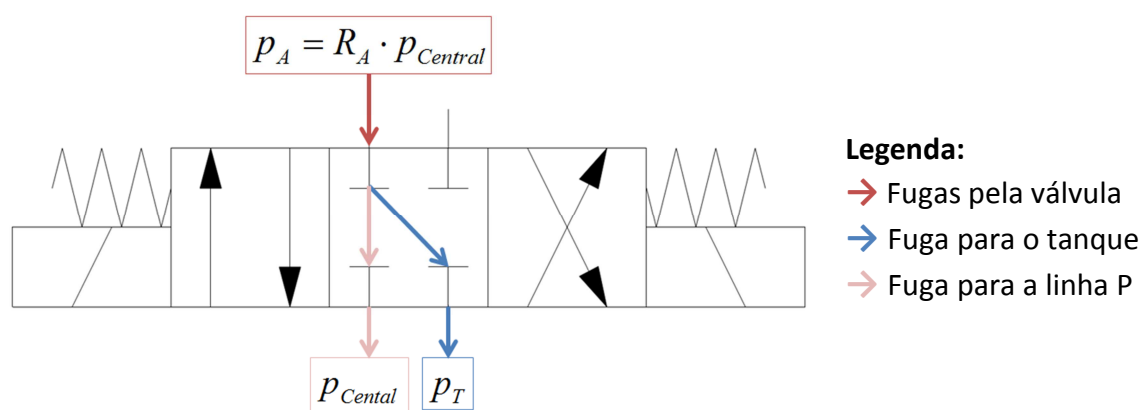


Figura 5.11: Exercício D.2 - Fugas pela válvula

Embora não existam valores que sirvam de referência para comparar e justificar este resultado, verifica-se que com o aumento da pressão existe um aumento das fugas pela válvula, como esperado, dado se estar face a um escoamento laminar.

5.2.3. Apreciação Geral dos Exercícios

Agora é feita uma apreciação geral dos resultados dos exercícios que compõem o grupo de exercícios D.

No exercício D.1 é possível verificar que quando um volume fechado de fluido hidráulico é sujeito a uma certa pressão, este deforma-se. Conclui-se, então, que o fluido hidráulico é compressível.

Após tratamento dos resultados obtidos, chega-se a valores do módulo compressibilidade muito próximos do valor de referência.

Por outro lado, no exercício D.2, verifica-se que com o aumento da pressão, maior é o caudal de fugas pela válvula direcional, dado se estar face a um escoamento laminar.

5.3. Grupo de Exercícios E – Motor Bidirecional

Este grupo de exercícios é constituído por dois exercícios onde é possível observar as vantagens e características de utilização da hidráulica proporcional no controlo de pressão e velocidade de rotação de um motor hidráulico. O circuito hidráulico característico deste grupo apresenta-se abaixo.

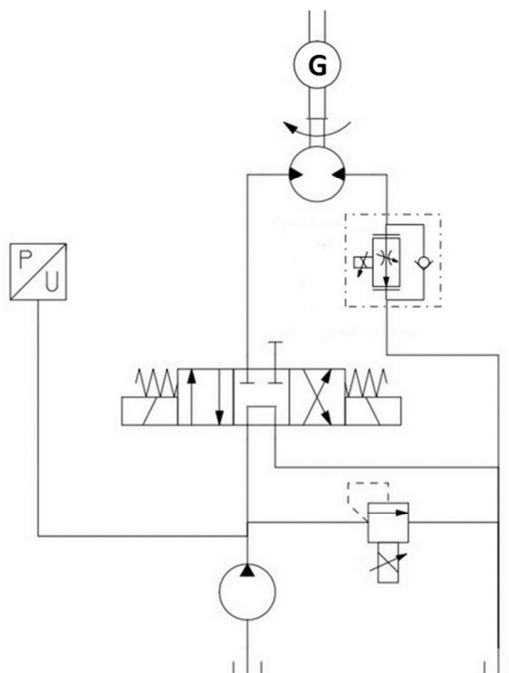


Figura 5.12: Grupo de Exercícios E - Circuito hidráulico

O circuito hidráulico é constituído por uma válvula direcional 4/3 (que poderá ser substituída por uma válvula 2/2), por um motor hidráulico bidirecional, uma válvula reguladora de caudal em *Meter-Out* e por uma válvula limitadora de pressão proporcional. Ainda existe um transdutor de pressão na linha de pressão e um taquímetro DC acoplado ao veio do motor hidráulico.

O presente grupo encontra-se dividido da seguinte forma:

- **Exercícios E.1** – Exercício onde é possível avaliar o comportamento do controlo de pressão e do controlo da velocidade de rotação de um motor para diferentes parâmetros de controlo, nomeadamente ganho proporcional e integral;
- **Exercícios E.2** – Exercício onde é possível avaliar a capacidade de realizar posicionamento de um motor hidráulico utilizando hidráulica proporcional.

Tal como no grupo de exercícios anterior, na interface Homem-Máquina, há inicialmente um conjunto de janelas onde é possível ver uma breve descrição do grupo, verificar o circuito hidráulico, ligar a central e selecionar um exercício (Anexo A).

5.3.1. Exercício E.1

Este é um exercício de demonstração didática que tem como objetivo mostrar as vantagens e características de utilização da hidráulica proporcional, nomeadamente, no controlo da pressão instalada no sistema e no controlo da velocidade de um motor hidráulico.

Assim sendo, neste exercício, é realizado o controlo da pressão e o controlo da velocidade de rotação de um motor (ver secções 5.1.1 e 5.1.2, respetivamente). O utilizador tem à sua disposição a capacidade para alterar os parâmetros que caracterizam quer o ganho proporcional quer o ganho integral, por forma a observar o efeito de cada um deles sobre o comportamento do sistema.

5.3.1.1. Interface Homem-Máquina

Inicialmente, surge uma janela introdutória com diversas informações sobre o exercício (Anexo A). Após isto, surge a seguinte sequência de janelas de realização do exercício:



Janela 1 – Definição de Velocidade e Pressão

- Aqui é possível definir a pressão de referência do sistema e a velocidade de referência de rotação do motor



Janela 2 – Parâmetros dos Controladores

- Pressionando “Prop. Controlo”, surge uma janela onde é possível alterar o ganho integral e proporcional dos controladores

5.3.1.2. *Resultados Obtidos*

O exercício E.1 foi realizado a várias pressões, a diferentes velocidades de rotação e utilizando diferentes valores dos ganhos de controlo disponíveis, sendo possível retirar as seguintes conclusões:

- Para um ganho integral e um ganho proporcional muito pequenos, o utilizador pode verificar que o controlo de velocidade de rotação e o controlo de pressão demoram muito tempo a atingir as suas referências e a reagirem a uma perturbação;
- Para um ganho integral e um ganho proporcional moderados, o utilizador pode verificar que existe um controlo de pressão e controlo de velocidade eficaz (atingido com relativa rapidez as suas referências) e com uma boa e suave reacção a perturbações;
- Para um ganho integral sucessivamente maior, o utilizador pode verificar um aumento significativo da sobrelongação quando a referência para o controlo se mantém constante;
- Para um ganho proporcional elevado, tanto no controlo de pressão como no controlo de velocidade, o utilizador pode verificar que se cria uma grande oscilação no controlo (grandes variações do erro);
- Para um ganho integral elevado, em ambos os controlos, o utilizador pode verificar que há uma grande oscilação no controlo (grandes variações do erro);
- Para pressões baixas, não é possível assegurar a velocidade de rotação máxima do motor hidráulico (320 RPM), uma vez que parte do caudal fornecido pela bomba é conduzido para o reservatório pela válvula limitadora de pressão proporcional;
- Para velocidades de rotação muito elevadas, não é possível assegurar pressões elevadas, devido ao facto de o motor hidráulico não ter nenhuma carga aplicada e de a válvula reguladora proporcional se encontrar completamente aberta, não oferecendo assim nenhuma resistência ao fluxo de caudal.

Este exercício de demonstração didáctica permite ao utilizador analisar a influência de diferentes ganhos no controlo de velocidade e pressão e, assim, criar várias situações em que se realiza um bom ou mau controlo de velocidade e de pressão.

5.3.2. Exercício E.2

Este é um exercício de demonstração didática onde é possível analisar o posicionamento angular de um motor hidráulico, com sentido de rotação único, com recurso à hidráulica proporcional. Na figura abaixo, encontra-se o perfil de velocidades que caracteriza este exercício.

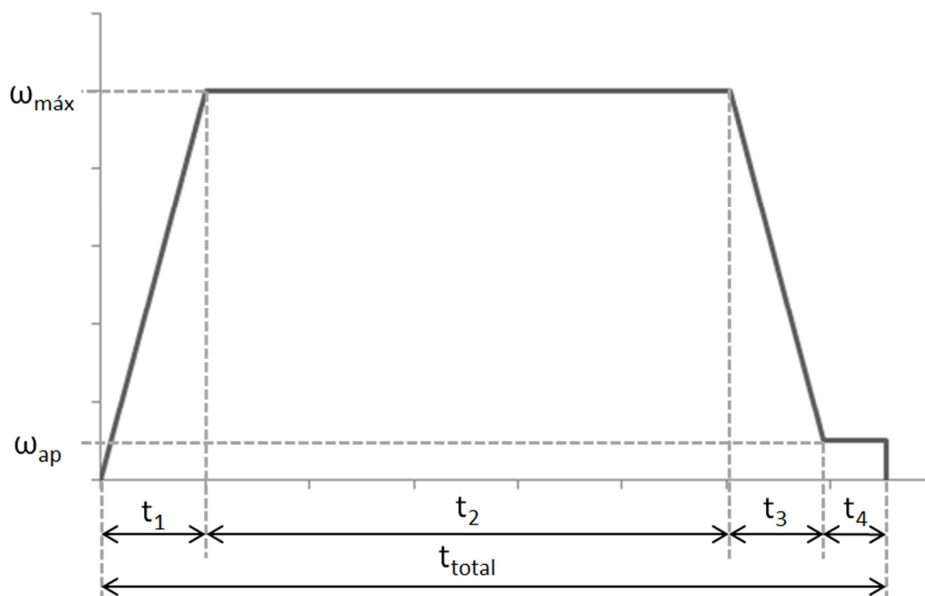


Figura 5.13: Exercício E.2 - Perfil de Velocidades

Uma das grandes vantagens da hidráulica proporcional é a utilização de rampas, que visa a redução de choques hidráulicos no sistema causados por arranques e paragens demasiado rápidas. Assim sendo, como se pode observar no perfil velocidades, o movimento de posicionamento do motor hidráulico é realizado em 4 fases:

- **Rampa de Aceleração:** aceleração progressiva até à velocidade máxima pretendida;
- **Movimento à Velocidade Máxima:** movimentação à velocidade máxima;
- **Rampa de Desaceleração:** desaceleração progressiva até à velocidade de aproximação;
- **Movimento à Velocidade de Aproximação:** movimentação a uma velocidade muito baixa até que o ponto de destino seja alcançado.

Como já foi referido anteriormente, existe uma roda dentada acoplada ao veio do motor. Com esta roda dentada e recorrendo ao detetor indutivo a ela associado é possível saber, a cada instante, a posição angular incremental do motor. Este *feedback*

de posição é necessário para assegurar o cumprimento de um ângulo final alvo, em função de um perfil de velocidades desejado.

Por outro lado, e por forma a se controlar a posição e a velocidade de rotação do motor, são utilizados quer o controlo de posição e quer o controlo de velocidade desenvolvidos (ver secções 5.1.2 e 5.1.3., respetivamente).

Para a realização do posicionamento, poder-se-á optar entre 4 tipos de perfis de movimentos:

- **Muito Lento:** velocidade máxima ($\omega_{máx}$) limitada a 20 [RPM];
- **Lento:** velocidade máxima ($\omega_{máx}$) limitada a 50 [RPM];
- **Médio:** velocidade máxima ($\omega_{máx}$) limitada a 150 [RPM];
- **Rápido:** velocidade máxima ($\omega_{máx}$) limitada a 250 [RPM].

Por sua vez, a aceleração (a), a velocidade de aproximação (ω_{ap}) e a distância de aproximação (d_{ap}), serão fixas e sem possibilidade de serem alteradas.

Cada nível de velocidade máxima só poderá ser selecionado se a soma dos tempos de aceleração (t_1) e desaceleração (t_3) for inferior ao tempo de movimento a velocidade máxima (t_2), ou seja:

$$t_2 > t_1 + t_3 \Leftrightarrow d_t > d_{ap} + \frac{\omega_{máx}^2 - \omega_{ap}^2}{2a} + \frac{(2 \cdot \omega_{máx} - \omega_{ap}) \cdot \omega_{máx}}{a} \quad (22)$$

onde d_t é o deslocamento total.

Assim sendo, e sabendo que a aceleração é de 20 [RPM/s], a distância de aproximação é de 4 dentes e a velocidade de aproximação é de 20 RPM, é possível concluir que:

- O movimento “*Lento*” só é possível ser realizado para deslocamentos angulares superiores a 70 dentes;
- O movimento “*Médio*” só é possível ser realizado para deslocamentos angulares superiores a 650 dentes;
- O movimento “*Rápido*” só é possível ser realizado para deslocamentos angulares superiores a 1850 dentes.

5.3.2.1. Interface Homem-Máquina

Tal como no exercício anterior, inicialmente, surge uma janela introdutória com diversas informações sobre o exercício (Anexo A). Após isto, surge a seguinte sequência de janelas de realização do exercício:



Janela 1 – Definição da Pressão e do Número de Dentes de Deslocamento

- Aqui é possível definir a pressão do sistema durante o exercício e o número de dentes para deslocamento angular.



Janela 2 – Definição do Tipo de Perfil de Movimento

- Tipo de Movimento: Muito Lento, Lento, Médio ou Rápido;
- Premindo em “Iniciar” dá-se início ao exercício.



Janela 3 – Execução do Exercício

- Durante a realização do exercício surge a mensagem “Em Execução” e será exibida a pressão, velocidade de rotação, tempo decorrido e progresso em cada instante.
- Premindo em “Parar” o exercício é interrompido e todos os dados adquiridos até ao momento são apagados.

Exercícios D

Exercícios E



Motor Bidirecional

Pressão Máxima = 28 [bar]

Pressão Mínima = 40 [bar]

Veloc. Máx. Média = 55 [RPM]

Velocidade Média = 41 [RPM]

Tempo Total = 12.0 [s]

Tempo Aceleração = 2.2 [s]

Tempo Desaceleração = 1.8 [s]

Tempo Veloc. Aprox = 10.0 [s]




Novo



Janela 4 – Fim do Exercício

- Terminado o exercício, os resultados são exibidos;
- Premindo em “Novo” poder-se-á iniciar um novo exercício.

5.3.2.2. Resultados Obtidos

Por forma a contrapor os valores experimentais com os valores teóricos, são agora apresentados as expressões que permitem calcular os diversos tempos teóricos que caracterizam cada um dos movimentos:

- **Tempo de aceleração (t_1):**

$$t_1 = \frac{\omega_{máx}}{a} \quad (23)$$

- **Tempo à velocidade máxima (t_2):**

$$t_2 = \frac{2 \cdot a \cdot (d_T - d_{ap}) - 2 \cdot \omega_{máx}^2 + \omega_{ap}^2}{2 \cdot \omega_{máx} \cdot a} \quad (24)$$

- **Tempo de desaceleração (t_3):**

$$t_3 = \frac{\omega_{máx} - \omega_{ap}}{a} \quad (25)$$

- **Tempo de aproximação (t_4):**

$$t_4 = \frac{d_{ap}}{\omega_{ap}} \quad (26)$$

Sendo fixas, a aceleração ($a = 20$ [RPM/s]) e a velocidade de aproximação ($\omega_{ap} = 20$ [RPM]), é possível calcular, independentemente da distância total a ser percorrida, os tempos de aceleração e desaceleração para cada movimento:

| Tipo de Movimento | $\omega_{m\acute{a}x}$ [RPM] | t_1 [s] | t_2 [s] |
|-------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| Muito Lento | 20 | 1,0 | 0,0 |
| Lento | 50 | 2,5 | 1,5 |
| Médio | 150 | 7,5 | 6,5 |
| Rápido | 250 | 12,5 | 11,5 |

Tabela 5.1: Exercício E.2 - Tempos

Por outro lado, e sabendo que a distância de aproximação também é fixa ($d_{ap} = 4$ [dentes]), é possível afirmar que teoricamente o tempo de aproximação é de 1 [s].

Determinados teoricamente os tempos que caracterizam os movimentos deste exercício, são agora apresentados os seus resultados. Assim sendo, foi realizado um exercício para cada tipo de movimento a uma pressão de 35 [bar].

Movimento Rápido:

Nas condições apresentadas, realizou-se o movimento rápido para uma distância de 1900 dentes. Os valores obtidos apresentam-se abaixo.

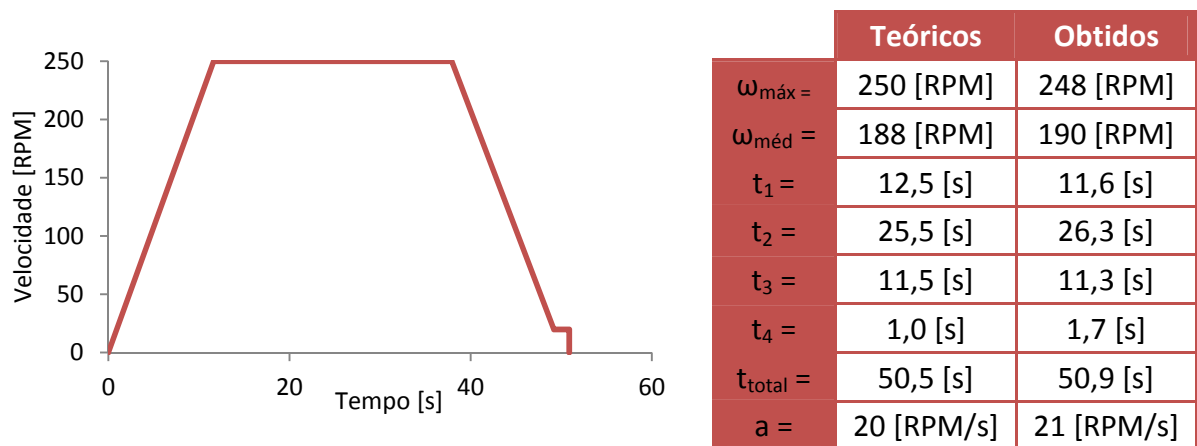


Figura 5.14: Resultados do exercício E.2 (Movimento rápido)

Neste movimento, a aceleração manteve-se com um erro de 5% em relação ao valor definido. Por outro lado, o tempo de aproximação excedeu o previsto, em valor significativo.

Movimento Médio:

De seguida, realizou-se para uma distância de 800 dentes o movimento médio. Obtiveram-se os seguintes resultados:

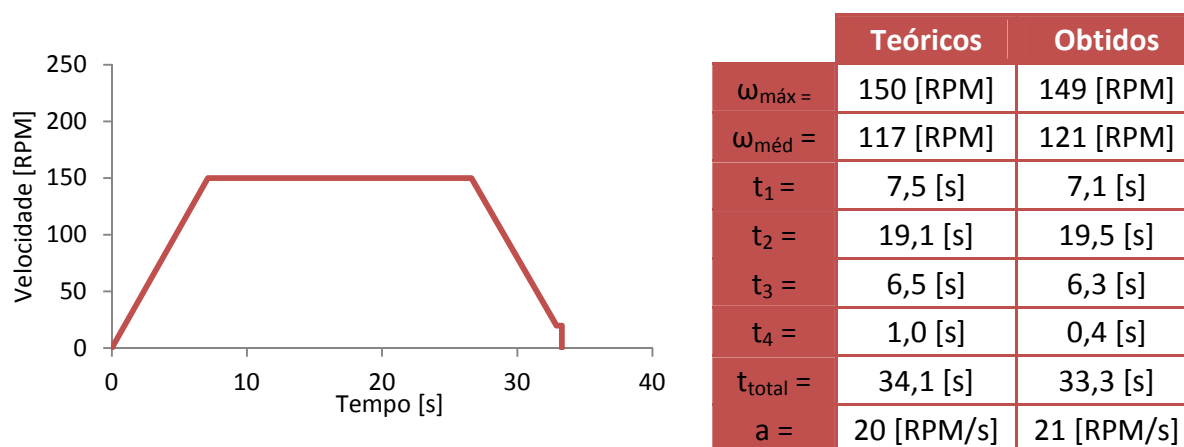


Figura 5.15: Resultados do exercício E.2 (Movimento médio)

Analisando o movimento, pode-se verificar que o movimento foi cerca de 2% mais rápido que o previsto, o que se traduziu num aumento da velocidade média em cerca de 3%. Por outro lado, a aceleração apresenta um erro de 5% em relação ao valor definido e o tempo de aproximação foi mais baixo que o valor previsto.

Movimento Lento:

Realizou-se um movimento lento para uma distância de 100 dentes, obtendo-se:

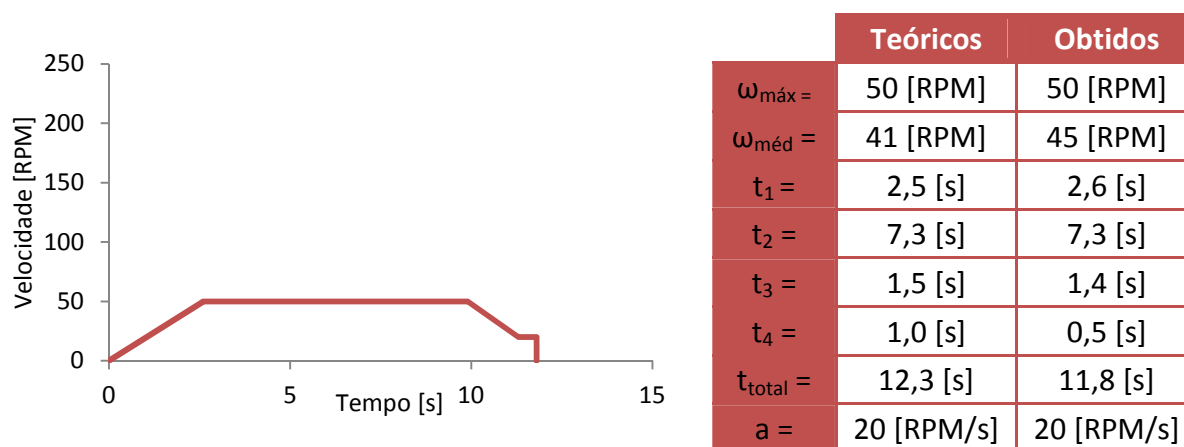


Figura 5.16: Resultados do exercício E.2 (Movimento lento)

O movimento foi cerca de 4% mais rápido que o valor calculado, o que se traduziu num aumento da velocidade média, em relação ao valor previsto, em igual percentagem. Por outro lado, a velocidade de aproximação foi significativamente diferente que o valor previsto.

Movimento Muito Lento:

Por fim, foi realizado um movimento muito lento para uma distância de 100 dentes, obtendo-se os seguintes resultados:

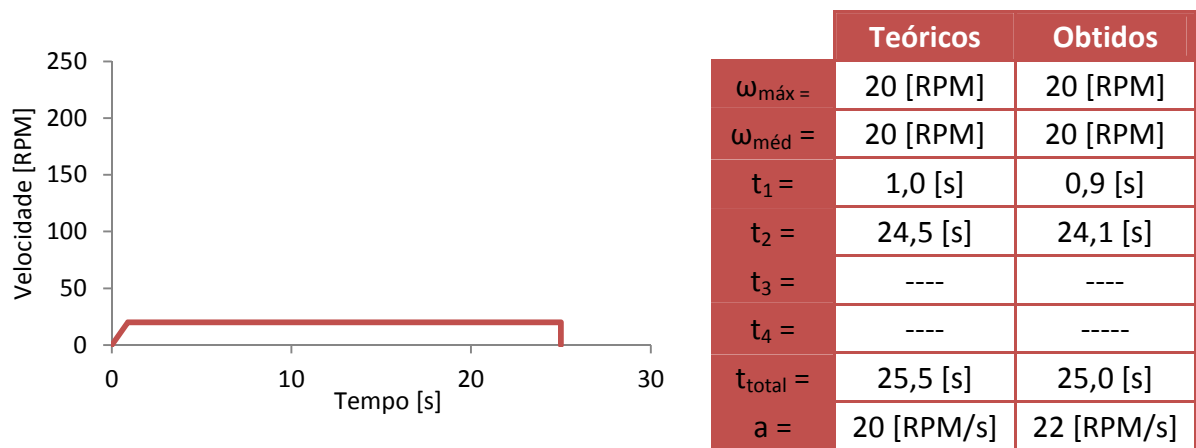


Figura 5.17: Resultados do exercício E.2 (Movimento muito lento)

Analisando os resultados acima apresentados, verifica-se que o movimento foi cerca de 5% mais rápido que o calculado e que a aceleração apresenta um erro de 2% em relação ao valor pretendido.

Concluindo, em todos os movimentos, a aceleração mantém-se em valores aceitáveis com erros máximos em relação ao valor definido de 5%. Por outro lado, o tempo de aproximação diferiu significativamente em relação ao valor calculado, mas, no entanto, o movimento nunca excedeu a distância definida.

Os erros acima referidos, podem-se dever a ação proveniente do controlo de posição, que se reflete numa alteração da velocidade de referência para seguimento das referências de posição.

5.3.3. Apreciação Geral dos Exercícios

Agora é feita uma apreciação geral dos resultados dos exercícios que compõem o grupo de exercícios E.

No exercício E.1, é possível analisar as vantagens da utilização da hidráulica proporcional para o controlo de pressão e velocidade de rotação. Neste exercício é ainda possível alterar os ganhos dos controlos e ver a sua influência.

Pela realização deste exercício, verifica-se que para ganhos proporcionais e integrais muito elevados, existe uma grande instabilidade em ambos os controlos. Por outro lado, é ainda possível verificar que aumentando o ganho integral, existe um aumento da sobrelongação.

Por fim, com a realização do exercício E.2, verifica-se que a utilização de rampas de aceleração e desaceleração resulta num movimento suave e sem picos de aceleração. Por outro lado, dado que existe um controlo de velocidade e posição durante a execução do movimento, garante-se que a posição final é sempre atingida, sem sobrelongação.

6. Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros

6.1. Conclusões

O principal objetivo desta dissertação consistiu na criação de um conjunto organizado de exercícios didáticos automatizados para utilização como ferramenta de ensino, no qual se inseria a criação de um ambiente de interface entre o utilizador e a banca, apelativa, autoexplicativa e de simples utilização. Este objetivo foi alcançado com sucesso, resultando na criação de 14 exercícios didáticos, distribuídos por 5 conjuntos distintos.

Inicialmente foram criados 3 grupos de exercícios (A, B e C), destinados à análise de circuitos hidráulicos onde se utilizam elementos de hidráulica convencional, de onde resultou um total de 10 exercícios didáticos automatizados.

No grupo de exercícios A (Cilindro de Duplo Efeito), com a realização do exercício A.1, conclui-se que os erros de posicionamento dos detetores de fim de curso conduzem a erros no cálculo das velocidades e caudais envolvidos nos movimentos do cilindro.

Por outro lado, no exercício A.2 é possível identificar esses erros de posicionamento e, assim, corrigi-los. Aqui, verifica-se que quanto menores os caudais envolvidos em cada um dos movimentos, menos se fazem sentir os erros de posicionamento dos detetores e os erros de aquisição de tempos pelo autómato.

O exercício A.3 possibilita uma mais fácil compreensão dos atrasos no início do movimento, que são características dos detetores fim de curso. Aqui, é possível verificar que o curso de atuação dos detetores é significativo em relação ao curso total do cilindro, e que é possível calculá-lo com melhor rigor para caudais pequenos (velocidades baixas), visto que, os erros de aquisição dos tempos são menos significativos. Por outro lado, é possível verificar que quanto menores forem os caudais envolvidos em cada movimento, menor é a parte do tempo de ciclo em que este permanece desatuado, isto é, os efeitos do tempo de resposta do circuito (que é essencialmente composto pelo tempo de resposta da válvula e do autómato) tornam-se menos significativos.

O exercício A.4 possibilita uma melhor compreensão dos efeitos do tempo de resposta do circuito hidráulico. Aqui, pode-se concluir que para caudais muito elevados, o movimento do cilindro em torno da transição do detetor de fim de curso possui uma amplitude muito elevada, impossível de ser medida pelo transdutor de deslocamento pois excede a sua gama de leitura. Conclui-se ainda que quanto menor for o caudal, menor é a amplitude do movimento, ou seja, os efeitos do tempo de resposta (que se traduz no não cumprimento imediato das instruções para inversão do sentido do movimento) tornam-se menos evidentes.

No grupo de exercícios B (Motor Bidirecional), com a realização do exercício B.1, verifica-se que é possível determinar, rapidamente e com boa repetibilidade, a velocidade para toda a gama de velocidades de rotação do motor hidráulico na banca didática

No exercício B.3 é possível concluir que devido à utilização de uma válvula direcional 4/3 de centro “Y” A-B-T e ao tempo de resposta do circuito hidráulico, para movimentos a velocidades elevadas (caudais elevados), ocorre um sobrecurso. Esse sobrecurso é tanto menor quanto menor o caudal envolvido no movimento e para caudais muito baixos deixa de ocorrer.

O sobrecurso analisado no exercício B.3 tem consequências no posicionamento do motor hidráulico no exercício B.2. Assim sendo, para caudais elevados existem erros de posicionamento do motor hidráulico e para caudais reduzidos estes erros anulam-se por completo

Por forma a tornar-se possível analisar a influência da dinâmica das válvulas nos exercícios dos grupos A e B, principalmente no que diz respeito às instruções para inversão do sentido de movimento, procedeu-se ao desenvolvimento do grupo de exercícios C (Dinâmica de Válvulas Direcionais), onde é possível determinar os tempos de comutação das válvulas direcionais utilizadas. Com a realização dos exercícios deste grupo, é possível concluir que os atrasos no início do movimento, referidos no exercício A.2, devem-se em parte à dinâmica da válvula direcional, isto é, aos tempos de comutação desta. Assim sendo, é possível ainda concluir que os tempos de comutação das válvulas são em grande parte responsáveis pelo não cumprimento imediato das instruções do sentido de movimento, que resultam no movimento oscilatório observado no exercício A.4 e nos erros de posicionamento do motor hidráulico observados no exercício B.2 e B.3.

Após o desenvolvimento dos grupos de exercícios acima referidos, foram desenvolvidos 2 grupos (D e E) onde são utilizados elementos de hidráulica proporcional e de onde resultou a criação de 4 exercícios didáticos automatizados e três controlos distintos (controlo de pressão, controlo de velocidade de rotação do motor hidráulico e controlo de posição do motor hidráulico).

Inseridos no grupo de exercícios D (Módulo de Compressibilidade e Fugas por Válvula), encontram-se o exercício D.1, onde é possível determinar experimentalmente o módulo de compressibilidade do fluido óleo-hidráulico, e o exercício D.2, onde se pode avaliar as fugas por uma válvula direcional 4/3 de centros fechados. Em ambos os exercícios é utilizado um controlo de pressão para assegurar que a pressão se mantém estável e nos valores pretendidos.

Assim sendo, no exercício D.1, é possível observar que quanto maior for a pressão a que um volume fechado de óleo se encontra sujeito, maior será a sua deformação. Daí se conclui que o fluido óleo-hidráulico é um fluido compressível. Com a realização deste exercício, chegam-se a valores de compressibilidade muito próximos do de referência, de onde se conclui que a diferença entre estes dois valores pode-se dever ao facto de o exercício ser realizado a pressões relativamente baixas, de existirem bolhas de ar fluido óleo-hidráulico ou ainda devido à própria deformação do corpo do cilindro.

Por outro lado, com a realização do exercício D.2, verifica-se que com o aumento da pressão maior é o caudal de fugas pela válvula direcional, dado se estar face a um escoamento laminar. Conclui-se ainda que esta relação não é linear, uma vez que o caudal de fugas obtido resulta da soma entre a fuga de A para T e a fuga de A para P. A fuga de A para P prende-se com o facto de a pressão no orifício A ser superior, na razão de áreas do cilindro, à pressão no orifício P.

No grupo de exercícios E (Motor Bidirecional), encontram-se inseridos dois exercícios didáticos automatizados, onde é possível analisar algumas vantagens e características da utilização da hidráulica proporcional no controlo de pressão e velocidade de rotação do motor hidráulico.

No exercício E.1 é possível alterar o ganho proporcional e integral do controlo de pressão e do controlo de velocidade de rotação do motor, por forma a verificar qual a sua influência em cada controlo. Assim, é possível criar várias situações em que é feito um bom e um mau controlo.

Com a realização do exercício E.2 é possível concluir que a utilização de rampas de aceleração e desaceleração resulta num movimento suave e sem picos de aceleração. Ao contrário do exercício C.3, neste exercício não existem imprecisões no posicionamento do motor hidráulico, uma vez que existe um controlo de posição e de velocidade durante a realização do movimento, que irá assegurar que, independentemente da velocidade máxima atingida e de perturbações externas, a aproximação ao destino final seja feita a uma velocidade muito reduzida.

É então possível afirmar que todos os exercícios criados ao longo desta dissertação são uma ferramenta importante para a compreensão das características e fenómenos de sistemas óleo-hidráulicos.

6.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Concluída a realização da dissertação, são de seguida, sugeridos os seguintes trabalhos futuros, por forma a melhorar as bancas didáticas de óleo-hidráulica.

Sugere-se o aumento do número de entradas digitais disponíveis, através da aquisição de uma nova base de relés, uma vez que, até ao momento, só está a ser utilizado apenas metade do número total de entradas digitais do autómato. Com este aumento, é possível ligar um maior número de dispositivos em simultâneo. Por outro lado, no caso das fichas de entradas analógicas, sugere-se que a configuração atual seja alterada, para que a cada ficha corresponda uma única entrada analógica, permitindo assim a ligação simultânea de 4 dispositivos de saída analógica.

Quanto ao motor hidráulico, sugere-se que a roda dentada acoplada ao seu veio seja substituída por uma com mais dentes, por forma a aumentar a resolução angular do par roda dentada/detector indutivo. Com esta alteração, ainda é possível determinar com mais precisão a velocidade de rotação do motor e a sua posição.

Dever-se-á, ainda, implementar uma monitorização na fonte de 24 V de potência, por forma a poder verificar o seu correto funcionamento.

7. Referências e Bibliografia












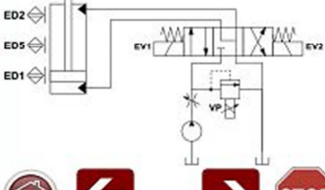









- [1] Schneider Electric, Magelis HMI STU 655/855 - Especificações gerais, 2011.
- [2] SMC, Compact Hydraulic Cylinder – Series CHQ.
- [3] M+S HYDRAULIC, HYDRAULIC MOTORS - MM/MP/MR/MH.
- [4] Telemecanique, XS1-M / XS2-M / XS4-P Analogue Proximity Sensors, 2002.
- [5] Sensor-Technik Wiedmann GmbH, Pressure Transmitter A08, 2008.
- [6] Festo, Proximity Sensors SIE..., Inductive, 2012.
- [7] SMC, Reed Switch Direct Mounting Style D-Z73/D-Z76/D-Z80.
- [8] Norgren Herion, PressureSwitches Series 18D.
- [9] Vickers, Solenoid Operated Directional Valves, 2008.
- [10] TOGNELLA, SINGLE-ACTING FLOW CONTROL VALVES TYPE FT 257/5.
- [11] Duplomatic Hydraulics, MD1D Solenoid Operated Directional Valves, 2005.
- [12] Wandfluh, Proportional Pressure Relief Valve AEPSVd6.
- [13] Rexroth, Proportional Pressure Relief Valve, Pilot Operated, 2004.
- [14] Duplomatic Oleodinamica, Direct Operated Flow Control Valve With Electric Proportional Control Series 52.
- [15] Eaton, Proportional Valve Control Power Plug, 2009.
- [16] F. Freitas, Elementos de Hidráulica Proporcional, Porto: Hidráulica, Soluções de Automação, 1998.
- [17] Schneider Electric, Magelis HMI STU 655/855 - User Manual, 2011.
- [18] Schneider Electric, Manual Twido Suite, 2008.
- [19] Schneider Electric, TwidoSuite V2.3. - Getting Started, 2011.
- [20] Schneider Electric, TwidoSuite V2.3. - Programming Guide, 2011.
- [21] Schneider Electric, Vijeo Designer Tutorial, 2005.

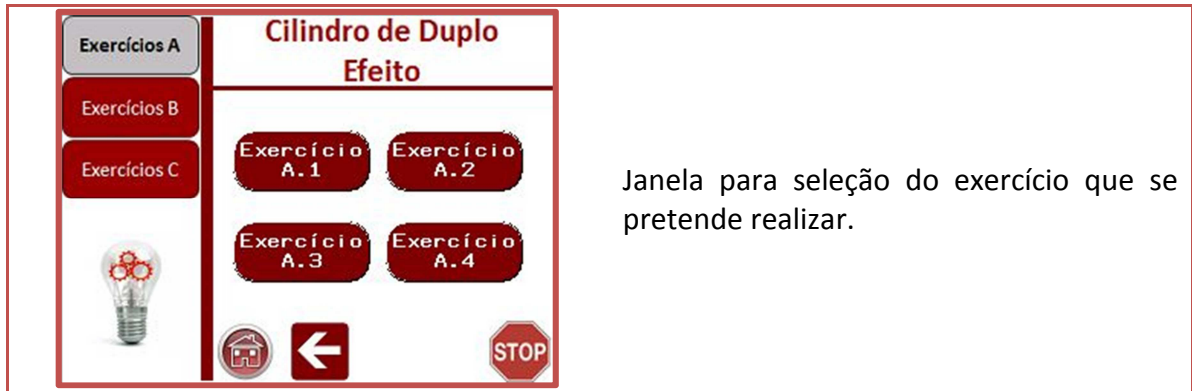
ANEXO A – Janelas da Interface Homem-Máquina

| | |
|----------------------------------|-----|
| A.1. Grupo de Exercícios A | 108 |
| A.2. Grupo de Exercícios B | 113 |
| A.3. Grupo de Exercícios C | 116 |
| A.4. Grupo de Exercícios D | 119 |
| A.5. Grupo de Exercícios E | 122 |

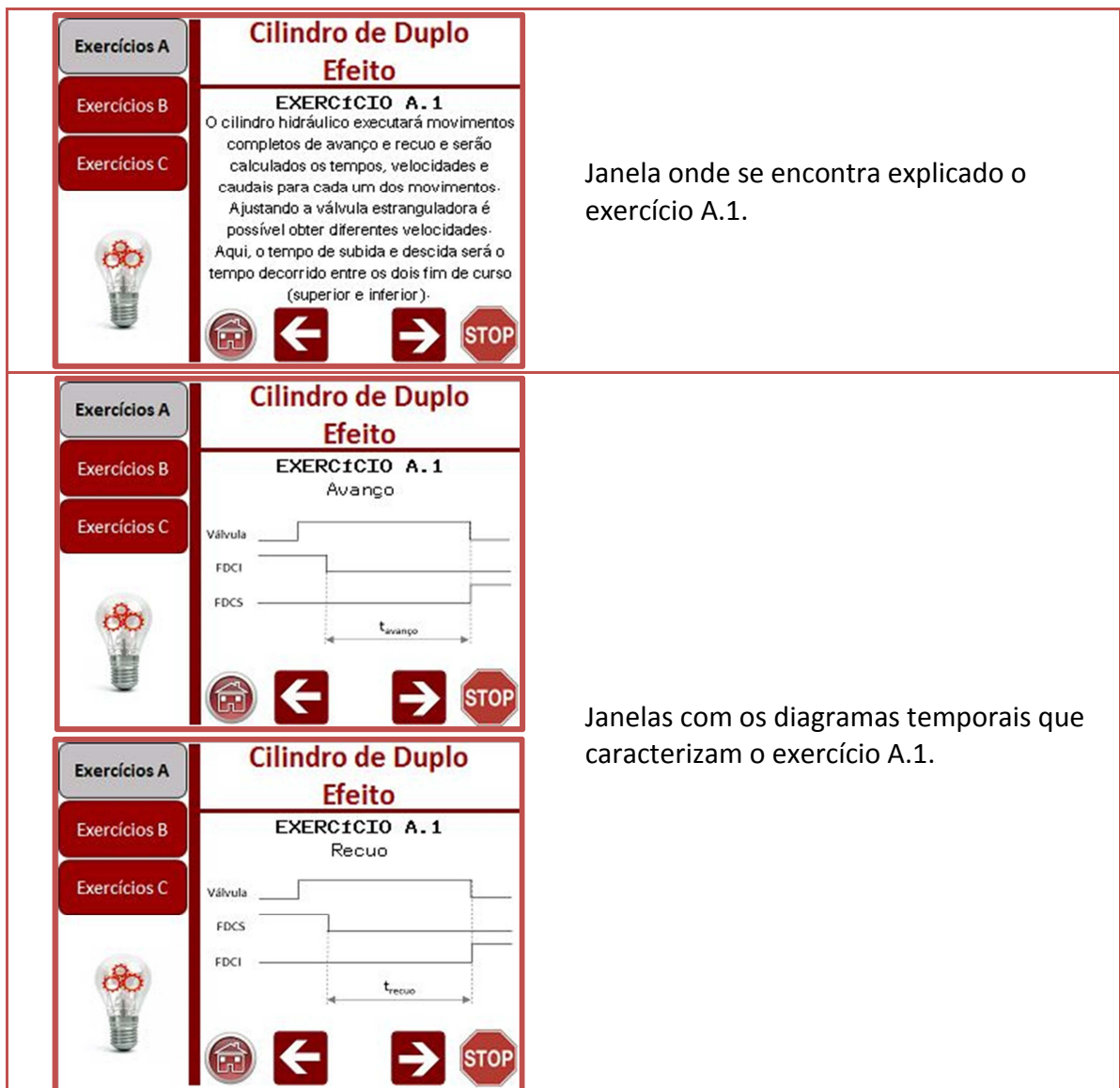
A.1. Grupo de Exercícios A

A.1.1. Janelas Introdutórias do Conjunto de Exercícios A

| | | |
|---|--|---|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>GRUPO DE EXERCÍCIOS A</p> <p>Este é um grupo de exercícios para analisar o comportamento de um circuito óleo-hidráulico constituído por uma válvula direcional 4/3 e um cilindro hidráulico de duplo efeito.</p>    | <p>Janela com breve texto introdutório ao grupo de exercícios A.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>Selecione o Cilindro</p> <p>Cilindro 1 </p> <p>Cilindro 2 </p>     | <p>Janela para seleção do cilindro hidráulico de duplo efeito.</p> <p>Quando selecionado um cilindro, o indicador respetivo ficará a verde.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>Verifique o circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo</p>      | <p>Janela para confirmação do circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>Antes de iniciar o ensaio ligue a central!</p> <p></p> <p>Ligar Central</p>    | <p>Janela para ligar a central hidráulica.</p> <p>Só é possível passar para a próxima janela quando a central se encontrar ligada.</p> |






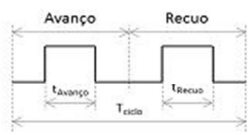

A.1.2. Janelas Introdutórias do Exercício A.1




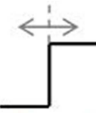


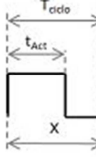
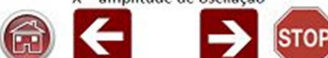
A.1.3. Janelas Introdutórias do Exercício A.2

| | | |
|---|---|---|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo</p> <p>Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.2</p> <p>Tal como no exercício A.1, o cilindro hidráulico executará movimentos completos de avanço e recuo e serão calculados os tempos, velocidades e caudais para cada um dos movimentos.</p> <p>Ajustando a válvula estranguladora é possível obter diferentes velocidades.</p>     | <p>Janelas onde se encontra explicado o exercício A.2.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo</p> <p>Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.2</p> <p>Por forma a minimizar o facto de os fim de curso não estarem posicionados exatamente no curso máximo do cilindro, no início de cada movimento o cilindro será completamente recuado e, feito isto, será iniciado o movimento e registado o tempo entre a atuação da válvula e a transição descendente do fim de curso de partida.</p>     | |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo</p> <p>Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.2</p> <p>Avanço</p>  <p>t_{01} – atraso no início do avanço t_{02} – tempo entre FDC's t_{03} – atraso no fim do avanço</p>     | <p>Janelas com os diagramas temporais que caracterizam o exercício A.2.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo</p> <p>Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.2</p> <p>Recuo</p>  <p>t_{11} – atraso no início do recuo t_{12} – tempo entre FDC's t_{13} – atraso no fim do recuo</p>     | |

A.1.4. Janelas Introdutórias do Exercício A.3

| | | |
|--|---|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.3</p> <p>Neste exercício, o cilindro oscilará em torno do fim de curso intermédio, isto é, o sentido do movimento será invertido sempre que detetada uma transição descendente do sinal proveniente do fim de curso intermédio.</p>  | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício A.3.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.3</p>  <p>$t_{\text{avanço}}$ – tempo de actuação no avanço t_{recuo} – tempo de actuação no recuo</p>  | <p>Janela com o diagrama temporal que caracteriza o exercício A.3.</p> |


A.1.5. Janelas Introdutórias do Exercício A.4

| | | |
|---|--|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.4</p> <p>Neste exercício, o cilindro oscilará em torno da transição ascendente do fim de curso intermédio.</p>   | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício A.4.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Cilindro de Duplo Efeito</p> <p>EXERCÍCIO A.4</p>  <p>t_{Act} – tempo de actuação X – amplitude de oscilação</p>  | <p>Janela com o diagrama temporal que caracteriza o exercício A.4.</p> |

Exercícios A


Exercícios B

Exercícios C




Cilindro de Duplo Efeito





EXERCÍCIO A.4

Posicionar Cilindro 

Ligue o sensor de proximidade à entrada EA2.2 e posicione-o até que o valor mostrado na janela seja maior de 6 mm:

6.4 mm



Janela para posicionamento do cilindro:






1. Clicando em “Posicionar Cilindro” este é posicionado a meio do seu curso;
2. Concluído o posicionamento deste, dever-se-á posicionar o transdutor de deslocamento a uma distância mínima de 6 mm da chapa que se encontra acoplada à haste.

A.2. Grupo de Exercícios B











A.2.1. Janelas Introdutórias do Grupo de Exercícios B

| | | |
|---|---|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>GRUPO DE EXERCÍCIOS B</p> <p>Este é um grupo de exercícios para analisar o comportamento de um circuito óleo-hidráulico constituído por uma válvula direcional 4/3 e um motor hidráulico bidirecional.</p>    | <p>Janela com breve texto introdutório ao grupo de exercícios B.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>Verifique o circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo</p>  <p>Ligue o detector à entrada CONT2</p>     | <p>Janela para confirmação do circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>Antes de iniciar o ensaio ligue a central!</p>  <p>Ligar Central</p>    | <p>Janela para ligar a central hidráulica.</p> <p>Só é possível passar para a próxima janela quando a central se encontrar ligada.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>Exercício B.1 Exercício B.2</p> <p>Exercício B.3</p>    | <p>Janela para seleção do exercício que se pretende realizar.</p> |






A.2.2. Janelas Introdutórias do Exercício B.1

| | | |
|---|--|---|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>EXERCÍCIO B.1</p> <p>Neste exercício, o motor será colocado em movimento e será determinada a velocidade de rotação deste e o respetivo caudal.</p> <p>Ajustando a válvula estranguladora de caudal é possível obter velocidades de rotação diferentes.</p>     | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício B.1.</p> |
|---|--|---|

A.2.3. Janelas Introdutórias do Exercício B.2









| | | |
|---|--|---|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>EXERCÍCIO B.2</p> <p>O motor irá rodar num sentido até um determinado ângulo, invertendo a rotação e descrever o mesmo ângulo no sentido oposto. Terminado o ensaio, dever-se-á verificar o disco graduado e comentar eventuais erros de posicionamento.</p> <p>Note que, ajustando as válvulas estranguladoras é possível obter diferentes velocidades de rotação.</p>     | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício B.2.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>EXERCÍCIO B.2</p> <p>Posicionar</p> <p>Com um elevado estrangulamento (que apenas permita que o motor rode a uma velocidade muito baixa), clique no botão "Posicionar Motor" até que o traço "0°" do disco graduado esteja alinhado com o detetor.</p>     | <p>Janela para posicionamento do motor hidráulico.</p> |

A.2.4. Janelas Introdutórias do Exercício B.3


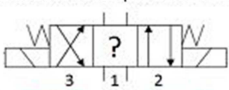




| | | |
|---|--|---|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <h2>Motor Bidirecional</h2> <h3>EXERCÍCIO B.3</h3> <p>Neste exercício, o utilizador definirá um número de dentes para cada movimento do motor. O motor irá entrar em rotação e quando o valor definido pelo utilizador for atingido, deixará de ser fornecido caudal ao motor.</p> <p>Ajustando a válvula estranguladora é possível obter diferentes velocidades de rotação.</p> <div></div> | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício B.3.</p> |
|---|--|---|


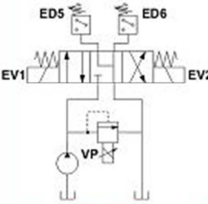








A.3. Grupo de Exercícios C

A.3.1. Janelas Introdutórias do Grupo de Exercícios C








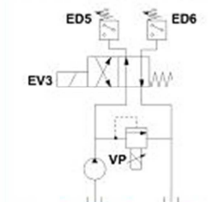




| | | |
|---|---|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>GRUPO DE EXERCÍCIOS C</p> <p>Este é um conjunto de ensaios para analisar os tempos de comutação de válvulas direcionais.</p>    | <p>Janela com breve texto introdutório ao grupo de exercícios C.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>Exercício C.1 Exercício C.2</p> <p>Exercício C.3</p>    | <p>Janela para seleção do exercício que se pretende realizar.</p> |





A.3.2. Janelas Introdutórias do Exercício C.1

| | | |
|---|--|---|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.1</p> <p>Neste exercício, será avaliada a dinâmica de uma válvula direcional 4/3 com centragem por molas. Para isso, a válvula comutará entre as suas 3 posições e serão determinados os tempos de comutação.</p>      | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício C.1.</p> |
|---|--|---|








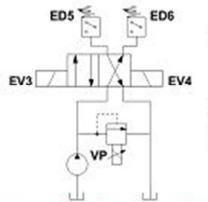








| | | |
|---|--|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.1</p>  <p>Verifique o circuito hidráulico e respectivas ligações ao sistema de controlo</p>     | <p>Janela para confirmação do circuito hidráulico e respectivas ligações ao sistema de controlo.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.1 Antes de iniciar o ensaio ligue a central!</p> <p>OFF</p> <p>Ligar Central</p>    | <p>Janela para ligar a central hidráulica.</p> <p>Só é possível passar para a próxima janela quando a central se encontrar ligada.</p> |

A.3.3. Janelas Introdutórias do Exercício C.2

| | | |
|---|---|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.2</p> <p>Neste exercício, será avaliada a dinâmica de uma válvula direcional 4/2 monestável. Para isso, a válvula comutará entre as suas 2 posições e serão determinados os tempos.</p>      | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício C.2.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.2</p>  <p>Verifique o circuito hidráulico e respectivas ligações ao sistema de controlo</p>     | <p>Janela para confirmação do circuito hidráulico e respectivas ligações ao sistema de controlo.</p> |


| | | |
|---|--|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.2 Antes de iniciar o ensaio ligue a central!</p> <p>OFF</p> <p>Ligar Central</p>    | <p>Janela para ligar a central hidráulica.</p> <p>Só é possível passar para a próxima janela quando a central se encontrar ligada.</p> |
|---|--|--|

A.3.4. Janelas Introdutórias do Exercício C.3


















| | | |
|---|--|--|
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.3</p> <p>Neste exercício, será avaliada a dinâmica de uma válvula direcional 4/2 biestável. Para isso, a válvula comutará entre as suas 2 posições e serão determinados os tempos.</p>      | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício C.3.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.3</p>  <p>Verifique o circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo</p>     | <p>Janela para confirmação do circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo.</p> |
| <p>Exercícios A</p> <p>Exercícios B</p> <p>Exercícios C</p>  | <p>Dinâmica de Válvulas Direcionais</p> <p>EXERCÍCIO C.3 Antes de iniciar o ensaio ligue a central!</p> <p>OFF</p> <p>Ligar Central</p>    | <p>Janela para ligar a central hidráulica.</p> <p>Só é possível passar para a próxima janela quando a central se encontrar ligada.</p> |

A.4. Grupo de Exercícios D

A.4.1. Janelas Introdutórias do Grupo de Exercícios D

| | | |
|---|--|--|
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>GRUPO DE EXERCÍCIOS D</p> <p>Este é um grupo de exercícios onde é possível determinar o módulo de compressibilidade do fluido óleo-hidráulico, bem como, avaliar as fugas por uma válvula direccional.</p>    | <p>Janela com breve texto introdutório ao grupo de exercícios D.</p> |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>Verifique o circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo</p>      | <p>Janela para confirmação do circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo.</p> |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>Antes de iniciar o ensaio ligue a central!</p>  <p>Ligar Central</p>    | <p>Janela para ligar a central hidráulica.</p> <p>Só é possível passar para a próxima janela quando a central se encontrar ligada.</p> |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>Exercício D.1</p> <p>Exercício D.2</p>    | <p>Janela para seleção do exercício que se pretende realizar.</p> |

A.4.2. Janelas Introdutórias do Exercício D.1






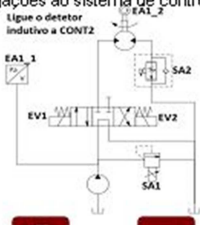













| | | |
|---|--|--|
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>EXERCÍCIO D.1</p> <p>Neste exercício, será analisada a compressibilidade do fluido óleo-hidráulico. Considerando a câmara secundária do cilindro fechada, e aumentando a pressão na câmara principal é possível sujeitar o volume de óleo contido na câmara secundária a uma pressão 1,46 vezes superior à da câmara principal.</p>     | |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>EXERCÍCIO D.1</p> <p>O módulo de compressibilidade (β) é definido como a constante de proporcionalidade entre variação de volume (ΔV) que um determinado volume de fluido (V) sofre, e a variação de pressão (Δp) a que este volume é sujeito.</p> $\beta = (1 - x) \cdot \frac{\Delta p}{\Delta x}$     | <p>Janelas onde se encontra explicado o exercício D.1.</p> |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>EXERCÍCIO D.1</p> <p>Posicionar Cilindro</p> <p>Ligue o sensor de proximidade à entrada EA2.2 e posicione-o até que o valor mostrado na janela seja maior de 6 mm:</p> <p>6.4 mm</p>     | <p>Janela para posicionamento do cilindro:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Clicando em “Posicionar Cilindro” este é posicionado a meio do seu curso; 2. Concluído o posicionamento deste, dever-se-á posicionar o transdutor de deslocamento a uma distância mínima de 6 mm da chapa que se encontra acoplada à haste. |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Compressibilidade e Fugas</p> <p>EXERCÍCIO D.1</p> <p>Retire a mangueira de ligação à câmara secundária do cilindro.</p> <p>Confirmar</p> <p>6.4 mm</p>     | <p>Após a janela de posicionamento do cilindro, surgirá uma “popup” com a mensagem. “Retire a mangueira de ligação à câmara secundária do cilindro”.</p> |

A.4.3. Janelas Introdutórias do Exercício D.2

| | |
|--|---|
| <div data-bbox="272 309 411 371">Exercícios D</div> <div data-bbox="272 383 411 445">Exercícios E</div> <div data-bbox="309 501 373 607"> </div> <div data-bbox="451 309 738 383"> Compressibilidade e Fugas </div> <div data-bbox="499 389 691 416"> EXERCÍCIO D.2 </div> <div data-bbox="427 445 762 584"> <p>Neste exercício, serão analisadas as fugas por uma válvula direccional 4/3 de gaveta de translação, uma vez que, estas válvulas apresentam problemas de estanquicidade interna, ou seja, no isolamento das câmaras internas ligadas aos diferentes orifícios.</p> </div> <div data-bbox="427 622 485 680"> </div> <div data-bbox="628 622 686 680"> </div> <div data-bbox="703 622 761 680"> </div> | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício D.2.</p> |
| <div data-bbox="272 696 411 759">Exercícios D</div> <div data-bbox="272 770 411 833">Exercícios E</div> <div data-bbox="309 889 373 994"> </div> <div data-bbox="451 696 738 770"> Compressibilidade e Fugas </div> <div data-bbox="499 777 691 804"> EXERCÍCIO D.2 </div> <div data-bbox="477 810 622 860"> Posicionar Cilindro </div> <div data-bbox="692 810 750 860"> </div> <div data-bbox="422 869 764 936"> <p>Ligue o sensor de proximidade à entrada EA2.2 e posicione-o até que o valor mostrado na janela seja maior de 6 mm:</p> </div> <div data-bbox="509 954 592 981"> 6.4 mm </div> <div data-bbox="692 954 750 1003"> </div> <div data-bbox="427 1010 485 1068"> </div> <div data-bbox="499 1010 558 1068"> </div> <div data-bbox="628 1010 686 1068"> </div> <div data-bbox="703 1010 761 1068"> </div> | <p>Janela para posicionamento do cilindro:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Clicando em “Posicionar Cilindro” este é posicionado a meio do seu curso; 2. Concluído o posicionamento deste, deve-se posicionar o transdutor de deslocamento a uma distância mínima de 6 mm da chapa que se encontra acoplada à haste. |

A.5. Grupo de Exercícios E

A.5.1. Janelas Introdutórias do Grupo de Exercícios E






| | | |
|---|---|--|
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>GRUPO DE EXERCÍCIOS E</p> <p>Grupo de exercícios para avaliação das vantagens e características da utilização da hidráulica proporcional no controlo de pressão e velocidade.</p>    | <p>Janela com breve texto introdutório ao grupo de exercícios E.</p> |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>Verifique o circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo</p> <p>Ligue o detetor indutivo a CONT2</p>      | <p>Janela para confirmação do circuito hidráulico e respetivas ligações ao sistema de controlo.</p> |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>Antes de iniciar o ensaio ligue a central!</p>  <p>Ligar Central</p>    | <p>Janela para ligar a central hidráulica.</p> <p>Só é possível passar para a próxima janela quando a central se encontrar ligada.</p> |
| <p>Exercícios D</p> <p>Exercícios E</p>  | <p>Motor Bidirecional</p> <p>Exercício E.1</p> <p>Exercício E.2</p>    | <p>Janela para seleção do exercício que se pretende realizar.</p> |

A.5.2. Janelas Introdutórias do Exercício E.1

| | |
|---|--|
| <div data-bbox="272 293 411 344">Exercícios D</div> <div data-bbox="272 367 411 418">Exercícios E</div> <div data-bbox="309 479 373 591"> </div> <div data-bbox="451 297 734 333">Motor Bidirecional</div> <div data-bbox="501 351 687 376">EXERCÍCIO E.1</div> <div data-bbox="424 396 766 443"> <p>Neste exercício, é possível controlar a velocidade do motor e a pressão do sistema.</p> </div> <div data-bbox="424 463 762 555"> <p>É possível ainda modificar o ganho proporcional e o tempo integral por forma a avaliar o efeito que estas têm no controlo proporcional e integral.</p> </div> <div data-bbox="432 602 485 658"> </div> <div data-bbox="628 602 687 658"> </div> <div data-bbox="703 602 762 658"> </div> | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício E.1.</p> |
| <div data-bbox="272 676 411 728">Exercícios D</div> <div data-bbox="272 750 411 801">Exercícios E</div> <div data-bbox="309 862 373 974"> </div> <div data-bbox="451 680 734 716">Motor Bidirecional</div> <div data-bbox="461 734 639 770">Ligar Ensaio</div> <div data-bbox="676 734 735 770">OFF</div> <div data-bbox="435 837 751 871">ENSAIO DESLIGADO</div> <div data-bbox="435 898 751 931">Por favor, ligue o ensaio!</div> <div data-bbox="432 981 485 1037"> </div> <div data-bbox="501 981 560 1037"> </div> <div data-bbox="703 981 762 1037"> </div> | <p>Para ser possível realizar o exercício é necessário pressionar “Ligar Exercício”.</p> |

A.5.3. Janelas Introdutórias do Exercício E.2







| | |
|--|---|
| <div data-bbox="272 1232 411 1283">Exercícios D</div> <div data-bbox="272 1305 411 1357">Exercícios E</div> <div data-bbox="309 1417 373 1529"> </div> <div data-bbox="451 1234 734 1270">Motor Bidirecional</div> <div data-bbox="501 1276 687 1301">EXERCÍCIO E.2</div> <div data-bbox="435 1299 751 1368"> <p>Este exercício didático permite avaliar o posicionamento de um motor hidráulico recorrendo a hidráulica proporcional.</p> </div> <div data-bbox="435 1388 751 1435"> <p>Por forma a evitar picos de aceleração e desaceleração, recorrer-se-á a rampas.</p> </div> <div data-bbox="424 1456 762 1525"> <p>A desaceleração será feita até uma velocidade lenta para aproximação ao ponto de destino.</p> </div> <div data-bbox="432 1536 485 1592"> </div> <div data-bbox="628 1536 687 1592"> </div> <div data-bbox="703 1536 762 1592"> </div> | <p>Janela onde se encontra explicado o exercício E.2.</p> |
| <div data-bbox="272 1615 411 1666">Exercícios D</div> <div data-bbox="272 1688 411 1740">Exercícios E</div> <div data-bbox="309 1800 373 1912"> </div> <div data-bbox="451 1617 734 1653">Motor Bidirecional</div> <div data-bbox="501 1662 687 1686">EXERCÍCIO E.2</div> <div data-bbox="501 1697 687 1722">Perfil de Velocidade</div> <div data-bbox="424 1731 762 1906"> </div> <div data-bbox="432 1917 485 1973"> </div> <div data-bbox="501 1917 560 1973"> </div> <div data-bbox="628 1917 687 1973"> </div> <div data-bbox="703 1917 762 1973"> </div> | <p>Janela onde se encontra apresentado o perfil de velocidades que caracteriza o exercício.</p> |

| | | |
|--|---|--|
| <div>Exercícios D</div> <div>Exercícios E</div> <div></div> | <div>Motor Bidirecional</div> <div>EXERCÍCIO E.2</div> <div>Posicionar</div> <div>Clique no botão "Posicionar Motor" até que o traço "0°" do disco graduado esteja alinhado com o detetor.</div> <div>   </div> | <p>Janela para posicionamento do motor hidráulico.</p> |
|--|---|--|

ANEXO B – Alertas e Avisos

| | |
|--------------------------------------|-----|
| B.1. Paragens de Emergência | 126 |
| B.2. Janelas Popup's de Alerta | 126 |

B.1. Paragens de Emergência

| | |
|---|--|
|  Paragem de Emergência Foi premido o botão de "Paragem de Emergência"  | <p>Quando premido o botão "STOP", os exercícios param e a central desliga-se. Para ser possível ligar novamente a central é necessário premir "Confirmar".</p> |
|  Paragem de Emergência Foi premido o botão de "Desligar Motor"  | <p>Quando premido o botão "Desligar Central", os exercícios param e a central desliga. Para ser possível ligar novamente a central é necessário premir "Confirmar".</p> |
|  Paragem de Emergência Pressão Máxima de 60 Bar Atingida  | <p>Quando a pressão máxima de 60 bar é atingida, os exercícios param e a central desliga. Para ser possível ligar novamente a central é necessário premir "Confirmar".</p> |

B.2. Janelas Popup's de Alerta

| | |
|---|--|
| NÍVEL DE ÓLEO BAIXO Por questões de segurança, é impossível ligar a central | <p>Quando o nível de óleo é baixo, surgirá esta janela <i>popup</i> e será impossível ligar a central.</p> |
|---|--|

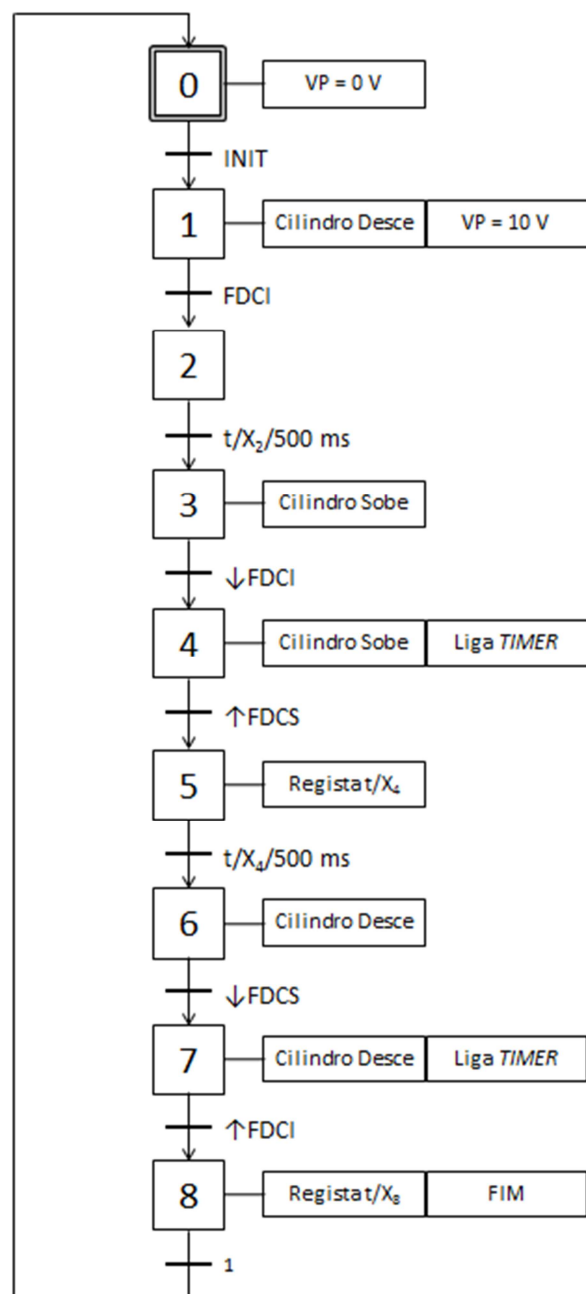
| | |
|--|--|
| <p>TEMPO DE ENSAIO EXCESSIVO</p> <p>O tempo de ensaio foi demasiado longo</p> <p>Confirmar</p> | <p>Quando o tempo de exercício ultrapassar os 60 segundos o exercício parará e surgirá esta janela <i>popup</i>. Para ser possível iniciar novamente o exercício ter-se-á de premir “Confirmar”.</p> |
| <p>FIM DE CURSO INTERMÉDIO NÃO DETETADO</p> <p>Por favor, verifique as ligações!!!</p> <p>Confirmar</p> | <p>Num exercício em que seja necessário a utilização do fim de cursos intermédio e se este não for detetado, surgirá esta janela <i>popup</i>. Caso isto aconteça, o exercício parará e para ser possível iniciar novamente ter-se-á de premir em “Confirmar”.</p> |
| <p>POSSÍVEL COLISÃO COM O SENSOR DE PROXIMIDADE</p> <p>Por favor, retire ou reposicione o sensor de proximidade</p> | <p>Quando estiver eminente uma colisão com o sensor analógico de proximidade, surgirá esta <i>popup</i> e o exercício parará Só quando o sensor for retirado ou reposicionado é que se torna possível a realização de um novo exercício.</p> |
| <p>TEMPO PARA POSICIONAMENTO DO MOTOR EXCEDIDO</p> <p>Por favor, verifique as ligações ao sistema de controlo ou diminua o estrangulamento.</p> <p>Confirmar</p> | <p>No exercício B.2, se o posicionamento do motor exceder os 30 segundos surgirá esta janela <i>popup</i> e o posicionamento parará. Só é possível voltar a fazer o posicionamento após o botão "Confirmar" ser premido.</p> |

ANEXO C – *GRAFCET's* Funcionais

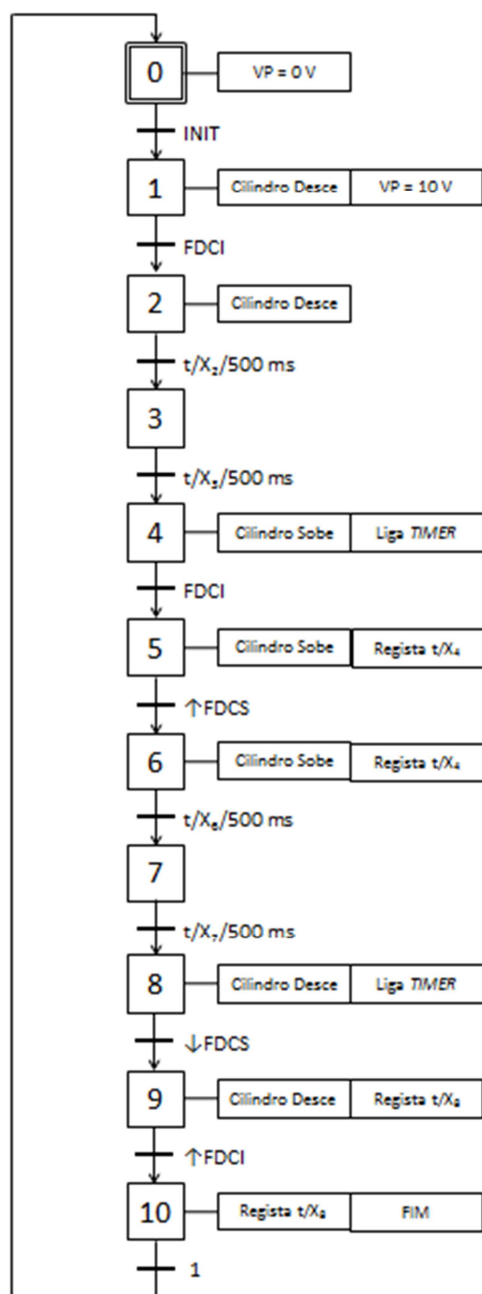
| | |
|----------------------------------|-----|
| C.1. Grupo de Exercícios A | 130 |
| C.2. Grupo de Exercícios B | 132 |
| C.3. Grupo de Exercícios C | 133 |
| C.4. Grupo de Exercícios D | 134 |
| C.5. Grupo de Exercícios E | 135 |

C.1. Grupo de Exercícios A

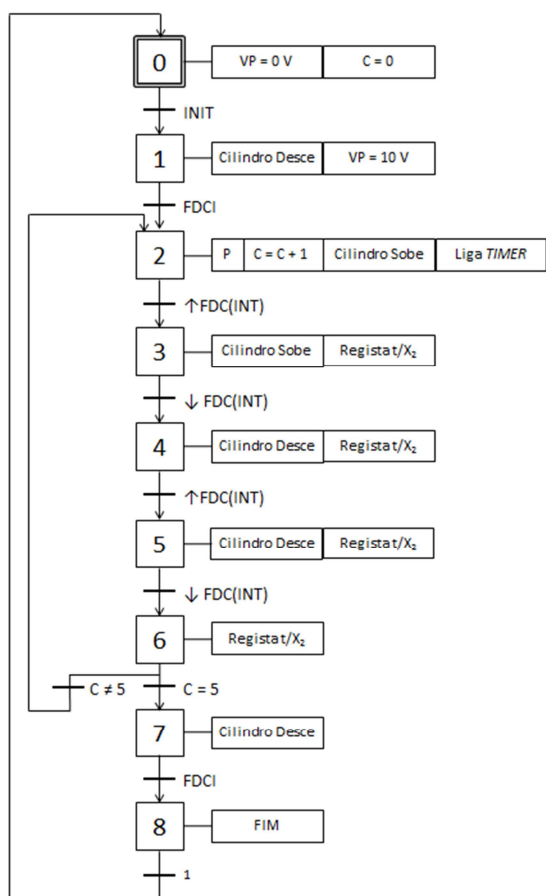
Exercício A.1



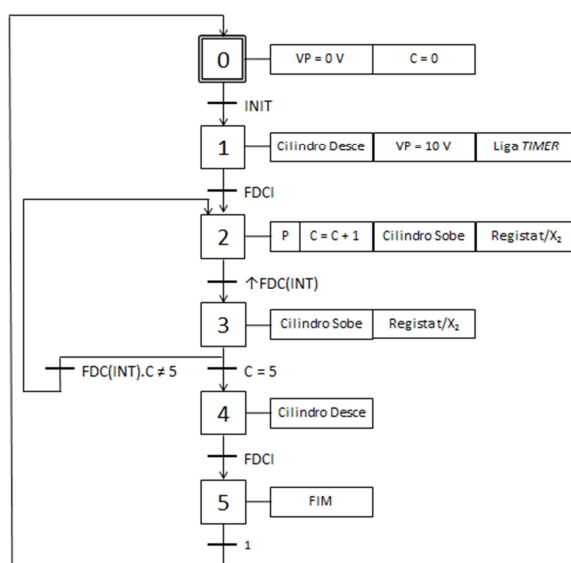
Exercício A.2



Exercício A.3

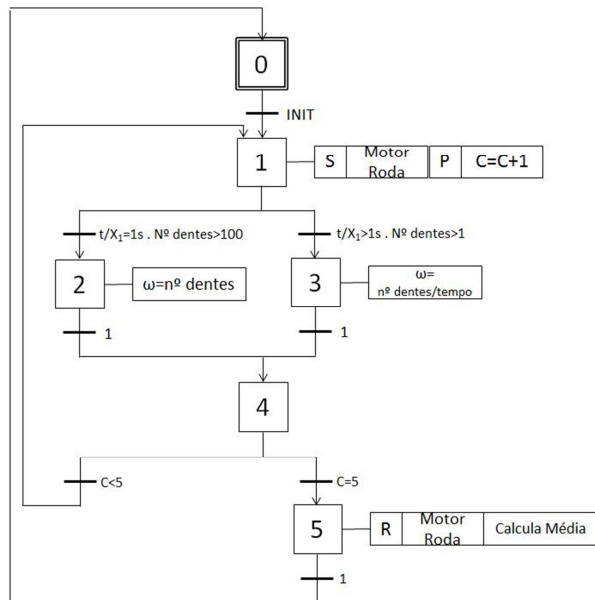


Exercício A.4

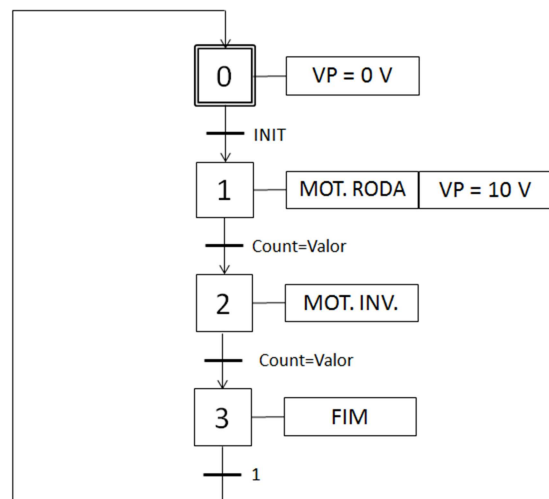


C.2. Grupo de Exercícios B

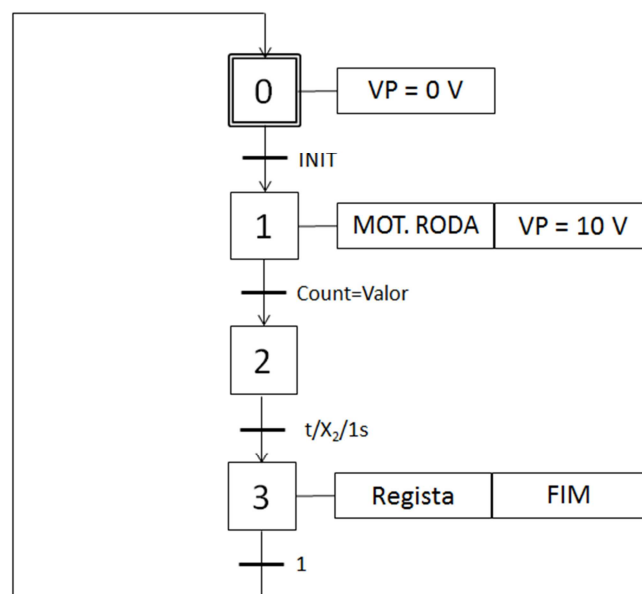
Exercício B.1



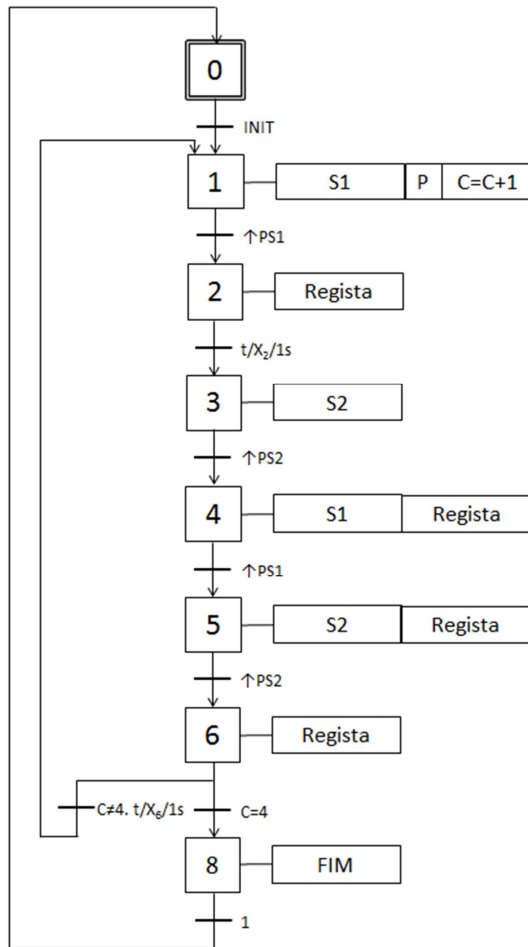
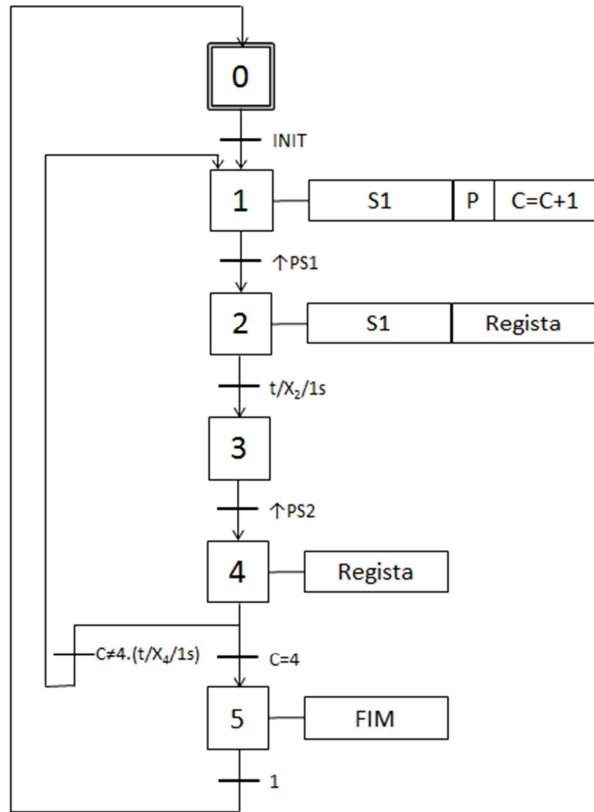
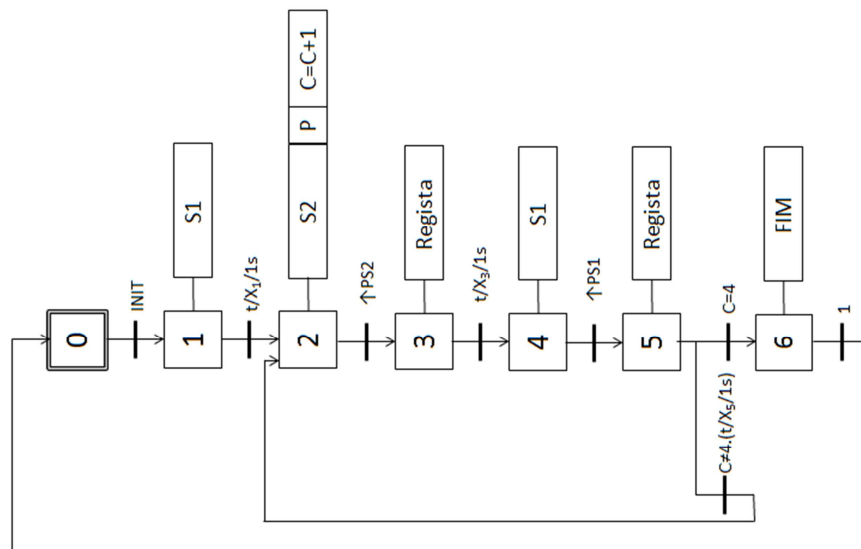
Exercício B.2



Exercício B.3

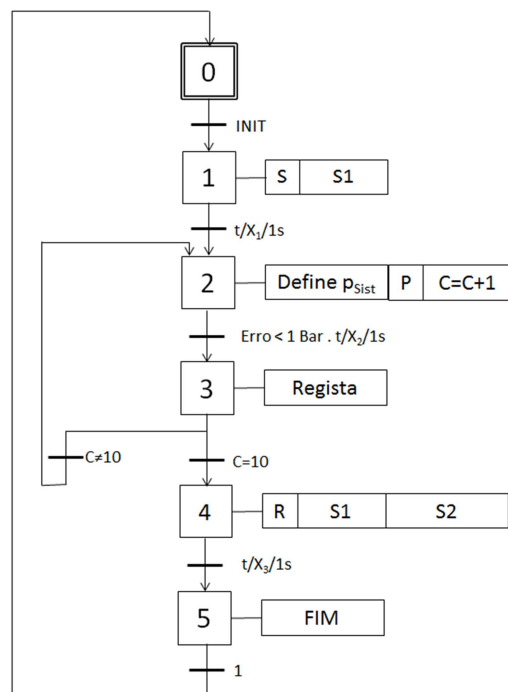


C.3. Grupo de Exercícios C

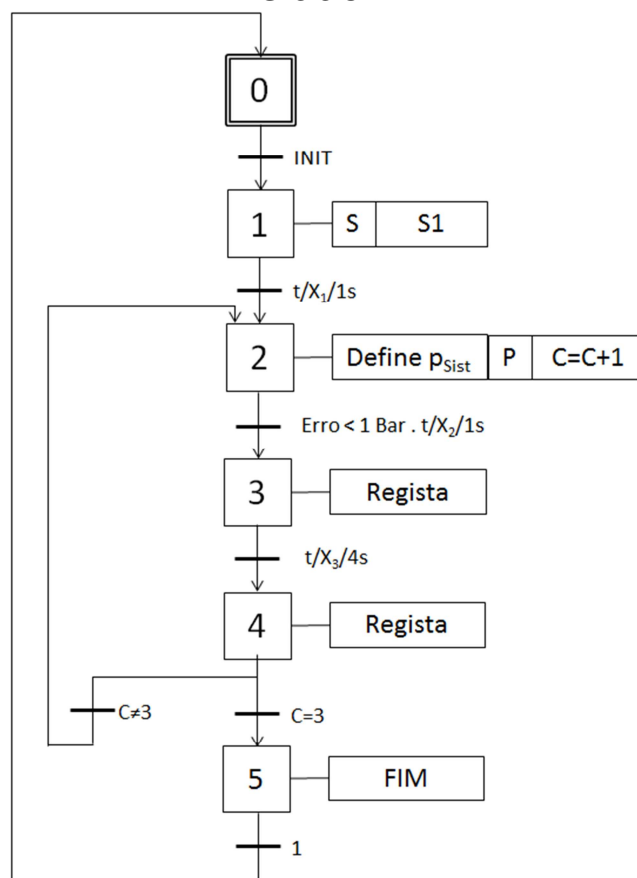
Exercício C.1

Exercício C.2

Exercício C.3


C.4. Grupo de Exercícios D

Exercício D.1

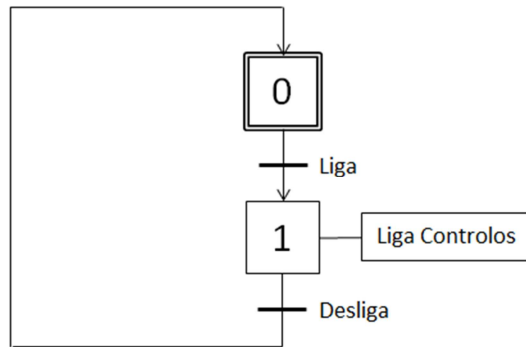


Exercício D.2



C.5. Grupo de Exercícios E

Exercício E.1



Exercício E.2

